

# Trabajo de Fin de Grado Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

## Modelo Eléctrico de Alimentación Ferroviaria

Autor: Fernando Almagro Yravedra

Tutor: Alejandro Marano Marcolini

**Dep. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016





Trabajo de Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Modelo Eléctrico de Alimentación Ferroviaria**

Autor:

Fernando Almagro Yravedra

Tutor:

Alejandro Marano Marcolini

Profesor Contratado Doctor

Dep. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016





Trabajo de Fin de Grado:    Modelo Eléctrico de Alimentación Ferroviaria

Autor:            Fernando Almagro Yravedra

Tutor:            Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:



# Agradecimientos

---

**E**n lo personal, me gustaría dedicar este humilde estudio a todas aquellas personas que estuvieron, están, y que estarán a mi lado, siendo un gran apoyo para mí. Especialmente me gustaría mencionar a mi hermana, Carlota, por la que profeso un cariño inefable, y que por siempre se ofrece con voluntad y una sonrisa a compartir este camino conmigo; que cada línea del código que tantas veces te he hecho ver sea una frase de agradecimiento.

En lo académico, agradecer a todos los docentes que, compartiendo su conocimiento con maestría, me han permitido llegar hasta aquí, en lo que espero sea el comienzo de una próspera carrera en la ingeniería. De entre todos ellos, me gustaría hacer especial mención a los dos siguientes mentores: Don Jesús Moreno Sánchez, por haberme descubierto con su sabiduría y destreza la disciplina que se ha convertido en mi pasión; y Don Alejandro Marano Marcolini, que con su infinita paciencia y guía me ha mostrado las bondades de la ingeniería eléctrica en estos últimos años, ayudándome así a sacar lo mejor de mí mismo como futuro ingeniero.

Que este humilde trabajo sea un pequeño homenaje a todos vosotros.

*Fernando Almagro Yravedra*  
*Autor*

*Milán, 2016*



# Resumen

---

En este trabajo se presenta y describe *Railway Simulation Tool, RST*: una herramienta basada en Python que, haciendo uso del programa *opensource* OpenDSS, permite crear y simular cualquier configuración ferroviaria posible de los sistemas a 25kV.

Dados los datos de posición, tiempo transcurrido y consumo de un tren hipotético a lo largo una línea ferroviaria cualquiera, el programa objeto de este trabajo construye el modelo de vía en cuestión y todo su sistema eléctrico. A lo largo de la ejecución iterada se recrea el movimiento de los diferentes convoyes recorriendo el trayecto, lo que permite conocer todas las variables a cada instante de la simulación. Adicionalmente se le ofrece al usuario la posibilidad de introducir información ulterior, como datos geométricos de la catenaria o eficiencia de los dispositivos eléctricos, para así maximizar el grado de detalle.

Los resultados elaborados muestran al usuario una amplia gama de información, que no sólo ayuda a entender el sistema de alimentación, sino que permite optimizar el mismo, dimensionarlo, o plantear situaciones específicas como caso de estudio.



# Abstract

---

Herein it is introduced and described ***Railway Simulation Tool, RST***: a Python-based tool, that employing the *opensource* software OpenDSS, allows the user to create and simulate any given railway electrification system at 25 kV.

Given the data of position, consumption and transurred time of a fictional train along the railway, the software builds the related model and all its electrical system. During the running time, by means of the numerous consecutive iterations, the movement of the trains is recreated, which makes possible to know the value of all the variables at each considered instant. In addition, the user has the option to declare further information, as the geometrical data of the catenary or the employed electrical devices efficiency, maximizing in that way the accuracy of the simulation.

The obtained results show the user a wide range of information, that does not just help it to understand the electrification system itself, but to optimize it as well through the variation of the different parameters involved, to size the employed devices, or to propound specific situations as a case of study.





# Índice

---

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Notación</i>	XI
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 La Importancia del Transporte	1
1.2 El Objeto de Estudio	3
1.3 <i>Railway Simulation Tool</i> : La Herramienta	4
1.3.1 OpenDSS	5
1.3.2 Python	6
1.4 Estructura del Documento	7
<b>2 Generalidades de los Sistemas de Alimentación</b>	<b>9</b>
2.1 Conexión a la Red	10
2.2 Transformación y Protección	10
2.3 Sistema de Catenaria	12
2.3.1 Hilos y Pantógrafo	13
2.3.2 Puntos Auxiliares	15
2.3.3 Punto de Origen de la Catenaria	18
2.3.4 EMI y <i>Stray Currents</i>	21
2.4 Operación Ferroviaria	24
<b>3 Particularidades de los Sistemas de Alimentación</b>	<b>29</b>
3.1 Alimentación a Corriente Continua	30
3.1.1 La Subestación Rectificadora	31
3.1.2 Sistema de Catenaria	33
3.2 Alimentación a 16'7 Hz	39
3.2.1 Alimentación Central y Distribuída	40
3.3 Alimentación a Frecuencia Industrial	43
3.3.1 Desequilibrio Introducido en la Red	43
3.3.2 Equipos de Alimentación	47
3.3.3 Sistema de Catenaria	48
3.3.4 Autotransformadores	50
<b>4 Fundamentos Teóricos del Railway Simulation Tool</b>	<b>55</b>

4.1	Planteamiento del Problema	55
4.1.1	El Circuito Empleado	55
4.1.2	El Movimiento de los Trenes	56
4.2	Escenarios Considerados	58
4.2.1	Extensión a Dos Vías	58
4.2.2	Los Hilos Equivalentes	60
4.3	Modelado de los Elementos	61
4.3.1	Conexión a la Red	61
4.3.2	La Subestación	61
4.3.3	Sistema de Catenaria	62
4.4	Cálculo de los Parámetros Eléctricos de la Catenaria	69
4.4.1	Información Necesaria	69
4.4.2	Retorno por Tierra	70
4.4.3	Cálculo de la Resistencia y la Reactancia	71
4.4.4	Cálculo de la Capacidad	73
<b>5</b>	<b>Implementación del Railway Simulation Tool</b>	<b>77</b>
5.1	Desarrollo Conceptual	77
5.1.1	Adquisición de Datos en Bruto	79
5.1.2	Tratamiento de Datos de Entrada	80
5.1.3	Cálculo de Parámetros RLC	81
5.1.4	Simulaciones y Resultados	82
5.1.5	Cambio de Datos de Entrada	85
5.2	RST: Adquisición y Tratamiento de Datos	85
5.2.1	Adquisición de Datos	85
5.2.2	Tratamiento de Datos	86
5.2.3	Gestión de Simulaciones y Presentación de Resultados	92
5.3	RST: Construcción de la Vía	95
5.3.1	OpenDSS como COM	96
5.3.2	Variables Empleadas	96
5.3.3	Subestación y Conexión a la Vía	98
5.3.4	Construcción de la Vía	99
5.3.5	Resolución	105
<b>6</b>	<b>Evaluación del Railway Simulation Tool</b>	<b>107</b>
6.1	Casos de Estudio	107
6.1.1	Tren a Tracción en Vía Única a 1x25	107
6.1.2	Tren en Frenada en Vía Única a 1x25	110
6.1.3	Tren a Tracción en Vía Doble a 1x25	112
6.1.4	Tren a Tracción en Vía Única a 2x25	116
6.1.5	Tren a Tracción en Vía Doble a 2x25	118
6.1.6	Tren de Vuelta a Tracción en Vía Doble a 2x25	120
6.1.7	Trenes Simultáneos a Tracción en Vía Doble a 2x25	121
6.1.8	Trenes No Simultáneos a Tracción en Vía Doble a 2x25	125
6.1.9	Trenes Simultáneos a Tracción y Frenada en Vía Doble a 2x25	127
6.2	Análisis de los Resultados	129

---

6.2.1	Comparación de las Configuraciones Posibles	130
6.2.2	Caídas de Tensión	131
6.2.3	Distribución de Corrientes en el 2x25	132
6.3	Caso Práctico	135
<b>7</b>	<b>Conclusiones y Líneas Futuras</b>	<b>141</b>
7.1	Conclusiones	141
7.2	Líneas Futuras	142
7.2.1	Comprobación Vía Real	142
7.2.2	Extensión al Resto de Sistemas	142
7.2.3	Desarrollo Aguas Arriba e Impacto en la Red	143
7.2.4	Evaluación Económica	143
7.2.5	Proyección Desde Cero	143
	<i>Índice de Figuras</i>	145
	<i>Índice de Tablas</i>	151
	<i>Bibliografía</i>	153



# Notación

---

<i>SE</i>	Subestación Eléctrica
<i>CC</i>	Corriente Continua
<i>CA</i>	Corriente Alterna
<i>AT</i>	Autotransformador/es
<i>AV</i>	Alta Velocidad
<i>POC</i>	Punto de Origen de Catenaria
<i>EMI</i>	Interferencias Electromagnéticas
<i>IB</i>	<i>Impedance Bound</i>
<i>PPS</i>	Punto de Alimentación Paralelo
<i>ATP</i>	Punto de Autotransformación
<i>DATP</i>	Doble Punto de Autotransformación
<i>PATP</i>	Punto de Paralelo y Autotransformación
<i>DPATP</i>	Doble Punto de Paralelo y Autotransformación
<i>DP</i>	Punto de Seccionamiento
<i>DPP</i>	Punto de Seccionamiento y Protección
<i>RP</i>	Punto de Subseccionamiento
<i>RPP</i>	Punto de Subseccionamiento y Protección



# 1 Introducción

---

Antes de entrar de lleno en el desarrollo del trabajo y su contenido, se le ofrece al lector una breve introducción, que trata de justificar la elección del tema considerado, así como las herramientas empleadas, el enfoque del mismo y su contenido.

## 1.1 La Importancia del Transporte

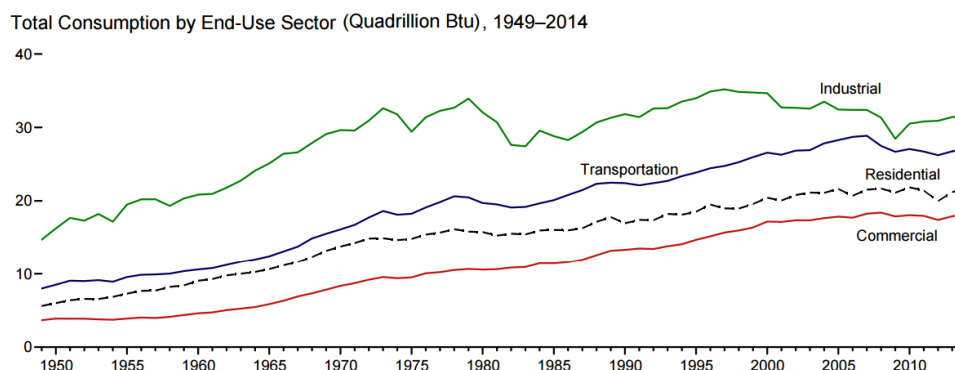
Es indiscutible la importancia de la que goza hoy día el transporte de mercancías y personas: su impacto no se limita a factores económicos, sino que se extiende al campo socio-cultural, político y medioambiental. Una red de transporte adecuadamente tejida puede abrir las puertas a una sociedad a interaccionar con su entorno, desarrollar su economía, enriquecer su cultura,... y en compendio a explotar todo su potencial e incrementar su bienestar. De igual manera, una sociedad capaz puede verse privada fácilmente de todo ello si su red de transporte es deficiente, condenándola así al estancamiento a todos los niveles.

La relevancia de la movilidad no ha hecho más que crecer con la globalización de la sociedad: muchos de los productos que compramos en nuestro entorno han sido diseñados más allá del otro confín del Atlántico, y probablemente hayan sido manufacturados al lado opuesto del continente. También la manera de hacer negocios ha cambiado, y requiere de traslación a destinos lejanos en poco tiempo para poder cerrar acuerdos. El enriquecimiento cultural y académico es cada día más dependiente del sistema actual de transporte: Programa Erasmus+, intercambios de estudio, congresos y ponencias internacionales... todos ellos son dependientes de la movilidad tal y como hoy día la concebimos.

A nivel mundial el consumo energético del sector del transporte asciende hasta el 27,75 % del consumo total de energía, y su crecimiento se ha mantenido fuerte y constante a pesar de las constantes mejoras en el rendimiento de los equipos y de la ralentización económica [1]. En el ámbito nacional se estimó para el año 2013 que el sector del transporte y almacenamiento contribuyó con 1.049.181 M€ al PIB español, lo que resulta el 4'4 % del mismo, y que empleó a 691,7 miles de personas [2]. Estos datos nos ayudan a comprender la relevancia e impacto de este sector a todos los niveles, no sólo como servicio a la sociedad, sino como el gran motor económico que es.

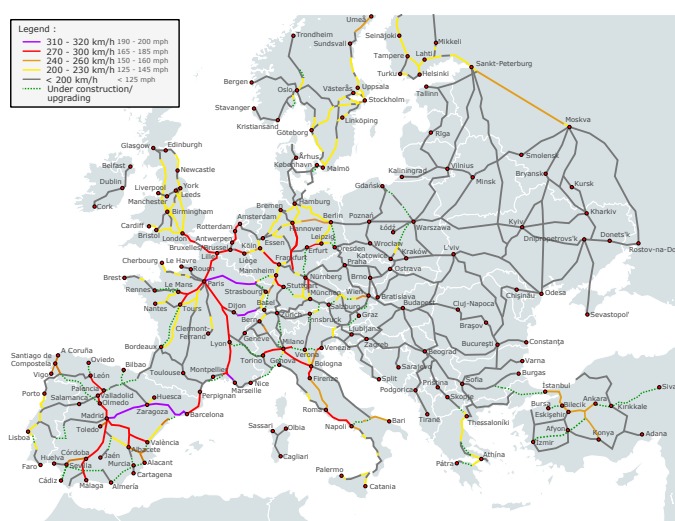
Para el año 2012 se estimó una densidad nacional de 398,0 Miles de millones de viajeros por km [3], lo que equivale en orden de magnitud a los datos de las series anuales de 2006 y 2007. Esto pone de relieve dos hechos: que el sector del transporte depende fuertemente del buen estado de la economía y la producción industrial (como igualmente se aprecia en

la figura adjunta), y que precisamente debido al estancamiento económico sufrido en los últimos años su potencial de expansión en el futuro inmediato es notable.



**Figura 1.1** Evolución del consumo del sector del transporte a nivel mundial. Fuente: [1].

De todos los medios de transporte en la actualidad, es sin duda el ferroviario el más polivalente y versátil: lo usan a diario millones de personas para salvar cortas distancias sin atascos y libre de contaminación, recorriendo grandes trayectos de ámbito nacional e internacional con un nivel de confort inigualable, transporta constantemente cantidades ingentes de materiales y productos de manera ordenada y veloz, y gracias a sus sistema de control y ordenamiento consigue una compenetración y eficiencia entre vehículos difícil de igualar.



**Figura 1.2** Mapa con las actuales y futuras principales vías ferroviarias en Europa. Fuente: [4].

El sistema ferroviario resulta igualmente atractivo en lo que a innovación concierne: el primer vehículo comercial autónomo no tripulado no fue otro que un tren urbano, el máximo absoluto en eficiencia de consumo se logra gracias al freno regenerativo de las locomotoras, y actualmente también el sistema consolidado más limpio existente es el ferroviario.



## 1.2 El Objeto de Estudio

Uno de los aspectos que brinda al sector ferroviario de un interés especial desde el punto de vista de la ingeniería eléctrica es su dependencia de la red. La mera existencia de una vía de tren alimentada eléctricamente ya supone per se un desafío para el controlador de la red nacional (tal y como veremos más adelante en el desarrollo del trabajo). Todas estas cuestiones ven su magnitud acentuada con el creciente número de proyectos en búsqueda de conexiones internacionales: debido a razones históricas raro es el caso en el que dos países comparten el planteamiento de su sistema ferroviario (salvo casos excepcionales de normalización internacional), por lo que también surge la necesidad de que la solución desarrollada sea compatible con las diferentes condiciones ya existentes en cada zona.

Los hechos previamente listados no han hecho más que incentivar históricamente el estudio de los trenes eléctricos y su entorno. Hoy día se hace un gran énfasis en temas como la investigación de los armónicos y los picos de tensión que producen, la interferencia electromagnética entre los sistemas de comunicación y la corriente del pantógrafo, el desarrollo de equipos que puedan trabajar bajo diferentes combinaciones de tensión y frecuencia... Pero ciertos otros aspectos de notable importancia, y quizás de una índole más práctica, no están así de explotados, y precisamente hacia esos temas este trabajo ha dirigido su mirada.



**Figura 1.3** Estación de Lecco, Italia. Captura propia.

Por los motivos expuestos previamente, se ha decidido enfocar el estudio presente hacia un campo más utilitarista: el impacto a nivel de eficiencia y consumo del sistema de alimentación escogido en una línea ferroviaria. Dicho con otras palabras: qué implica para el tren y para la red usar cierta configuración de suministro de potencia y no otra. *Aguas abajo* de la catenaria los esfuerzos se concentrarán en que la tensión de contacto y la corriente absorbida sean aquellas para las cuales la locomotora ha sido diseñada, mientras que *aguas arriba* interés reside en que la cesión y absorción de potencia sea lo más eficiente posible, aminorando al máximo su impacto en el equilibrio de la red industrial.

Se considera especialmente acertada esta elección debido a que si bien la variedad de elementos a bordo del tren es amplia y dependiente del tipo de ruta, el sistema de ali-

mentación es algo más constante y siempre necesario. Dicho de otra manera: tanto una locomotora a motor de inducción como otra a motor de imanes permanentes pueden funcionar bajo el mismo sistema de alimentación; pero no tan frecuente es el caso en el que dos sistemas de alimentación diferentes garanticen el funcionamiento de una misma locomotora. Así pues, de esta manera también se garantiza en el trabajo un campo de aplicación e interés considerablemente amplio.

De todas las configuraciones posibles se ha optado por la gama de **alimentación a 25kV**, principalmente por las siguientes razones: es la red de alta velocidad más extendida en el mundo, los pocos países que no la emplean la reciben con los brazos abiertos cuando un proyecto internacional exige un único sistema de alimentación, es una de las más eficientes e interesantes, y además es el sistema sobre el cual Italia y España (dos países formativamente importantes para el autor) han construido sus redes de transporte.

Para maximizar el realismo y veracidad de los resultados computados por el código, se ha tratado de manera rigurosa cada aspecto del mismo. Ello incluye tanto aspectos de interés teórico, como el tratamiento de los parámetros eléctricos en sistemas polifásicos no trifásicos, como otros de relevancia práctica, como es el tipo de conexión entre dos vías alimentadas por la misma SE. Estos diferentes temas serán sacados a colación a lo largo del desarrollo del documento.

### 1.3 *Railway Simulation Tool*: La Herramienta

Una vez se sabe *qué* se quiere conseguir, se ha de pasar al *cómo*. Precisamente el objetivo de este documento es ilustrar al lector sobre cómo se han conseguido las metas propuestas y mediante qué procesos, pero antes de proceder a ello se ha considerado oportuno tratar previamente los programas empleados y el carácter general del trabajo.

Más allá de simplemente realizar un trabajo de investigación sobre los aspectos relativos al sistema de alimentación dado, se plantea la elaboración de una herramienta, un elemento útil y dinámico que se adapte a unas condiciones variables y realistas. Ésto se ha llevado a buen puerto a través de un código de **Python**, bautizado como *Railway Simulation Tool*, *RST*, que comanda de manera externa al software *opensource* **OpenDSS** para recrear las condiciones de tránsito de un tren por una catenaria.

Sin entrar en un alto grado de detalle, *RST* (al que nos referiremos a lo largo del presente documento como herramienta, software, programa, código...) funciona de la siguiente manera: el usuario debe de facilitar unos datos mínimos en lo que concierne tanto a la explotación de la vía (posición y consumo del tren cada cierto tiempo a lo largo del trayecto, número de trenes y horas de salida,...), como a su topología (sistema de alimentación empleado, tramo de vía a estudiar,...). Una vez se tienen todos los datos necesarios el código los elabora según las preferencias del usuario, para a continuación comenzar un proceso iterativo que emula el transcurso real del tiempo: en cada iteración se construye la catenaria de manera incrementa desde la SE que la alimenta, ubicando los trenes en cuestión según su posición para la iteración actual. Una vez la catenaria ha sido terminada, se compila el modelo y se obtienen las variables de interés. Este proceso se repite una y otra vez hasta que todos los trenes considerados hayan abandonado el tramo de estudio, entonces se procede a recopilar y elaborar toda la información obtenida, para así finalmente

presentársela al usuario.

El programa objeto de este trabajo puede ser considerado tanto desde unas lentes utilitarias como a través de otras académicas: la herramienta bien puede emplearse para efectivamente introducir los datos de una vía real que va a ser proyectada y así poder dimensionar adecuadamente los equipos y optimizar algunos parámetros, o bien para comparar cómo variaría la explotación si en lugar del sistema actual de alimentación se hubiera escogido otro; pero análogamente puede ser utilizado para plantear situaciones interesantes a nivel académico, como es el caso por ejemplo del cruce entre dos trenes, uno en frenada y otro en tracción de igual valor.

Antes de pasar a lo relativo a la estructura del documento y así finalizar la introducción y comenzar propiamente el trabajo, se explicará y justificará brevemente la elección de los dos programas empleados: OpenDSS y Python.

### 1.3.1 OpenDSS

OpenDSS (*Open Distribution System Simulator*) es un programa propiedad de EPRI y desarrollado por Robert Dugan [5], enfocado a la resolución de sistemas de flujo de potencia en redes inteligentes, *smart grids*, y los sistemas de generación distribuida.

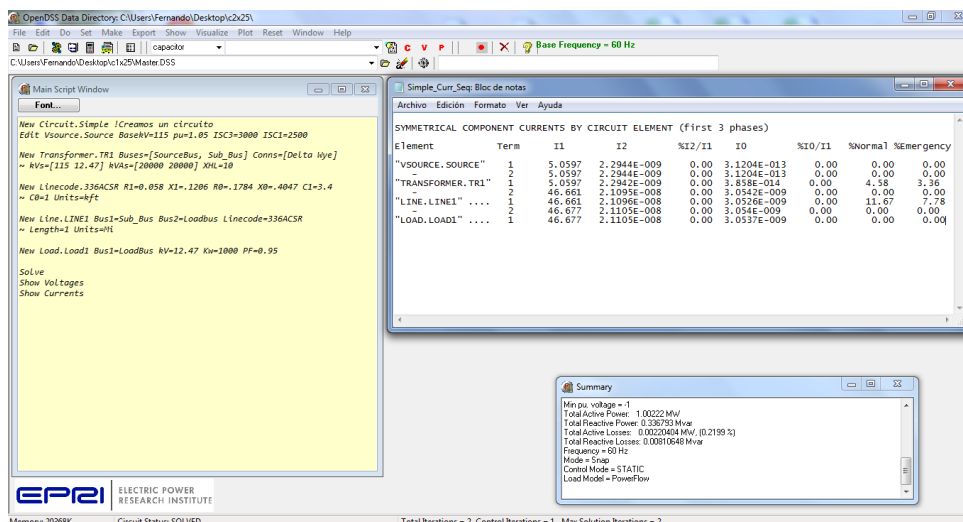


Figura 1.4 Interfaz típica de OpenDSS. Captura propia.

Uno de los aspectos más característicos de OpenDSS es su versatilidad: el programa se asemeja a un compilador de código donde cada sentencia crea un elemento de la red o bien define cómo resolver el sistema de ecuaciones. El proceso que se esconde tras la escasa interfaz de usuario no es demasiado complejo: según los elementos que se declaran y a qué barras se conectan se rellena una matriz de admitancias  $Y$ , la cual se empleará en un proceso u otro de resolución dependiendo de las preferencias del usuario. Así pues, lo mismo se puede resolver el sistema para que nos muestre el estado de la red en un instante determinado, como para que construya la evolución de la potencia inyectada en la red a lo largo de una serie anual.

Como la mayoría de software, OpenDSS consta de dos maneras de uso: *standalone* y

*COM*. En el primer modo el programa se utiliza directamente sin ningún tercero de por medio, mientras que en el segundo se emplea a través de un software externo (Python, Matlab, VBA...). Actualmente es el segundo modo el preferido, pues aumenta más todavía la libertad de uso del usuario, abriendo las puertas a iteraciones personalizadas fuera de las competencias propias de OpenDSS. Es precisamente esta segunda ventaja lo que a terminado de convencer a muchos de la conveniencia de su uso.

Hoy en día el empleo OpenDSS se ha diversificado completamente, si bien su uso más generalizado es el de resolución de sistemas de generación distribuida, debido a su simple enfoque y versátil manejo ya se utiliza en casi todos los ámbitos de los sistemas de potencia: flujo de armónicos, estabilidad de generadores, redes sometidas a control inteligente... y en ulterior caso a casi cualquier ejercicio que se le pueda ocurrir en lo relativo al flujo de potencias. Pero si bien OpenDSS es una magnífica herramienta para el análisis de flujo de potencia, ciertamente muestra ciertas carencias cuando queremos llevar a cabo otro tipo de estudios, como es el caso del análisis de transitorios. A día de hoy OpenDSS no consta de herramientas tan elaboradas como el resto de sus características para hacer frente a este tipo de situaciones. En cualquier caso, como el uso dado al programa en este trabajo poco tiene que ver con estos campos, no supone un problema en absoluto. Dicho esto, cabe destacar que poco a poco estas carencias se van paliando a la vez que se incrementan las herramientas del programa, gracias a la comunidad que hay tras el mismo y su cariz *opensource*.

Otro inconveniente del programa, aunque en esta ocasión no relacionado con su manera de trabajar, es la desfasada y pobre interfaz que ofrece (mostrada en la figura adjunta). Carece de cualquier tipo de ayuda al usuario a la hora de declarar elementos, métodos de solución o cualquier otra sentencia. No dispone en absoluto de ninguna herramienta de construcción gráfica *built-in* como es el caso del resto de programas del campo, y la presentación de resultados es igualmente compleja y poco intuitiva. Sea como fuere, estos últimos problemas están exclusivamente relacionados al uso del programa como *standalone*, por lo que apenas se le ha dedicado tiempo a solucionarlos.

En lo que respecta al trabajo, la elección de OpenDSS se justifica mediante los siguientes motivos: es un software cuyo uso está en pleno ascenso (cada vez son más las universidades e investigadores que lo emplean), su gran potencial confiere un gran valor añadido a un uso temprano del mismo, al ser de carácter libre es un programa en constante evolución y mejora, y su planteamiento simple y potente lo convierte en una herramienta óptima para procesos flexibles e iterativos como es el presente.

### 1.3.2 Python

A diferencia de OpenDSS, Python, más que conocido, es sin duda uno de los lenguajes de programación del momento: su uso ha sufrido un crecimiento espectacular, y hoy día se emplea a diario en tareas de diversa índole.

La consideración de Python en lugar de otros lenguajes está previamente condicionada por el uso de OpenDSS. Tal y como se dijo, utilizar OpenDSS como *standalone* es considerablemente molesto: iterar computaciones, declarar estructuras repetidas y explotar todo su potencial es bastante complejo y tedioso en definitiva. Afortunadamente ello es fácilmente paliable con el uso del software como *COM*. En esta situación la elección se

planteaba entre Matlab y Python, y ciertamente los motivos sobran para decantarse por el segundo: simplicidad, gratuidad, potencial, versatilidad, buena sinergia con OpenDSS...

De esta manera se construye enteramente *RST* sobre dos pilares de mentalidad abierta a innovadora, disponibles para cualquier usuario y sin ninguna barrera al conocimiento y la investigación.

## 1.4 Estructura del Documento

El presente documento no pretende hacer las veces de una recopilación y explicación detallada de cada apartado y módulo del programa que lo ocupa, en su lugar el objetivo es transmitir al lector la manera de trabajar del código, haciendo énfasis en las partes más interesantes desde el punto de vista ingenieril.

La parte inmediata del trabajo se dedica a informar al lector sobre las generalidades del sector ferroviario en lo que al aspecto técnico concierne. A pesar de que cada sistema es diferente, todos ellos comparten una estructura general y elementos concretos, las cuales son relevantes en cuanto al rango de aplicación del programa aquí descrito. Igualmente esta parte descriptiva resulta importante para comprender cómo se han modelizado posteriormente las diferentes partes involucradas en el sistema de alimentación ferroviario. Igualmente se le ofrecerá al lector una revisión de la operación ferroviaria, ya que al fin y al cabo será lo que caracterice las curvas de consumo de los convoyes a los que el sistema debe suministrar energía.

Tras ello se le ofrecerá al lector una revisión en mayor profundidad de los principales sistemas de alimentación, haciendo un repaso a sus orígenes y razonando sus ventajas e inconvenientes, así como realizando un breve análisis numérico en cuanto a sus características. Una vez vistos los sistemas nos centraremos en aquellos más relevantes para el trabajo:  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$ , para así tratar con alto grado de detalle sus características y particularidades, que serán determinantes para el desarrollo de la presente herramienta.

Una vez el lector disponga de conocimientos suficientes en lo que respecta al funcionamiento de los sistemas de alimentación y al comportamiento de la locomotora, se procederá a explicar el proceder de *RST* y sus diferentes aspectos.

Se dedicará un concreto apartado a los fundamentos teóricos del código, especialmente al cálculo de los parámetros eléctricos, pues además de ser importante su computación ha supuesto un bonito desafío académico desarrollar este módulo: las particularidades del sistema de catenaria le confieren especial interés, particularmente en el cálculo de la capacidad del sistema, debido a la presencia de los raíles y su empleo como medio para el retorno de la corriente.

A continuación se tratará la implementación práctica de *RST*, explicando su filosofía de funcionamiento y desarrollo tanto en OpenDSS como Python. Este apartado se centrará las partes más delicadas e interesantes en lo que se refiere al código per se y a su proceso computacional, haciendo un repaso a las soluciones propuestas a los diferentes problemas encontrados a lo largo de su desarrollo.

Llegados a este punto, el funcionamiento de *RST* ya le será más que familiar al lector,

por lo que se podrá pasar al estudio de los casos más representativos mediante los propios resultados arrojados por el código. A continuación se planteará un caso real de vía ferroviaria, para así poder poner en tela de juicio la utilidad del programa aquí descrito, y de paso realizar la comparación entre los resultados arrojados por un mismo trayecto explotando su configuración como  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$ .

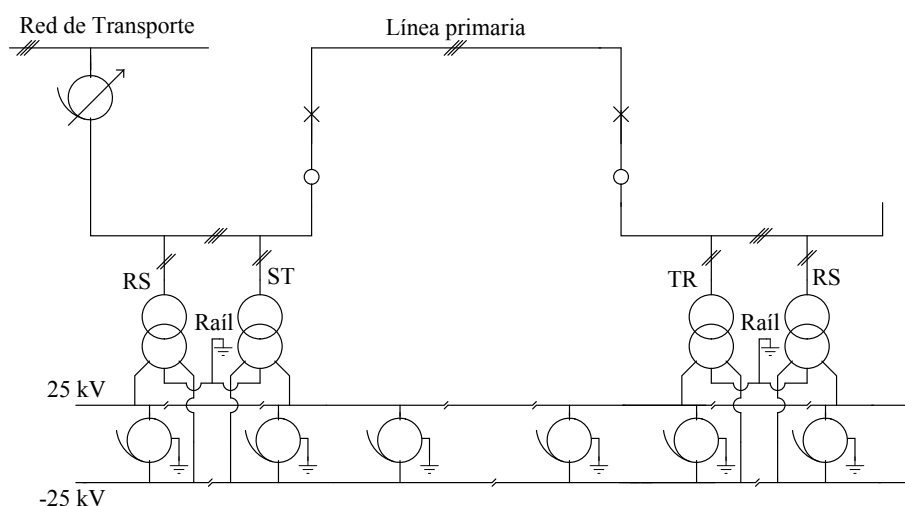
Para cerrar el documento se procederá a valorar todo lo visto previamente, considerando la futura aplicación real de *RST* y las líneas futuras a trazar: el impacto de un trayecto ferroviario en la red eléctrica y el análisis del proyecto de una nueva línea desde el inicio.

## 2 Generalidades de los Sistemas de Alimentación

---

A pesar de tener cada uno sus particularidades e idiosincrasia propia, la estructura de los diferentes sistemas de alimentación es siempre la misma: conexión de la SE a la red de transporte, transformación de la corriente y protección del sistema en la SE, y alimentación de la catenaria. La conexión a la red industrial suele variar poco o nada entre los diferentes sistemas, pero tanto la etapa de transformación como la de la energización de la catenaria dependen absolutamente del sistema en cuestión.

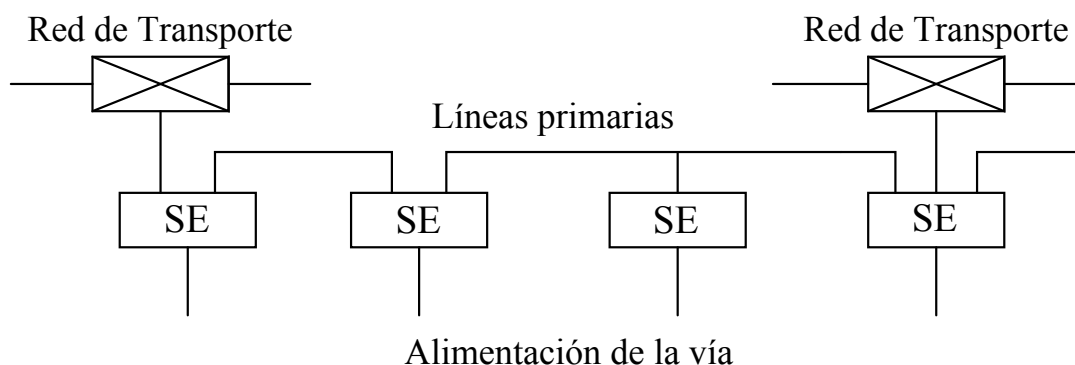
A continuación se describirán dichos elementos comunes y la estructura general de los sistemas de alimentación, los cuales serán estudiados en mayor grado de profundidad más adelante para cada tipo de configuración. Adicionalmente se añade un apartado para tratar brevemente la operación ferroviaria y las curvas de consumo ferroviarias, que ya que al ser los trenes los únicos elementos abastecidos por estos sistemas de alimentación, es menester conocer sus características como carga eléctrica.



**Figura 2.1** Diagrama típico simplificado del sistema de alimentación 2×25. Elaboración propia.

## 2.1 Conexión a la Red

Lo que prima a la hora de conectar la SE a la red es asegurar la continuidad del servicio en caso de falta tanto *aguas arriba*, como en la propia instalación, como *aguas abajo* de la misma. Un alto grado de redundancia se consigue facilitando a la SE varios puntos de conexión, ya sean desde la propia red industrial o entre otras SE mediante las llamadas líneas primarias, así como dotando a la instalación de la posibilidad de reconfigurarse según las líneas afectadas.



**Figura 2.2** Diversas configuraciones de conexión a la red industrial. Se muestran disposiciones en H, T y H con doble alimentación. Elaboración propia.

De manera general, según las condiciones existentes, se emplean las llamadas conexiones en **H** y **T**, tal y como muestra la figura adjunta. La configuración en **T** es la más vulnerable ante un fallo, pero también la más barata. Cuando se requiere un mayor grado de seguridad se opta por la distribución en **H**, que a su vez puede evolucionar en **H** de doble alimentación o doble barra, la cual queda reservada para los casos más vulnerables y críticos para la red.

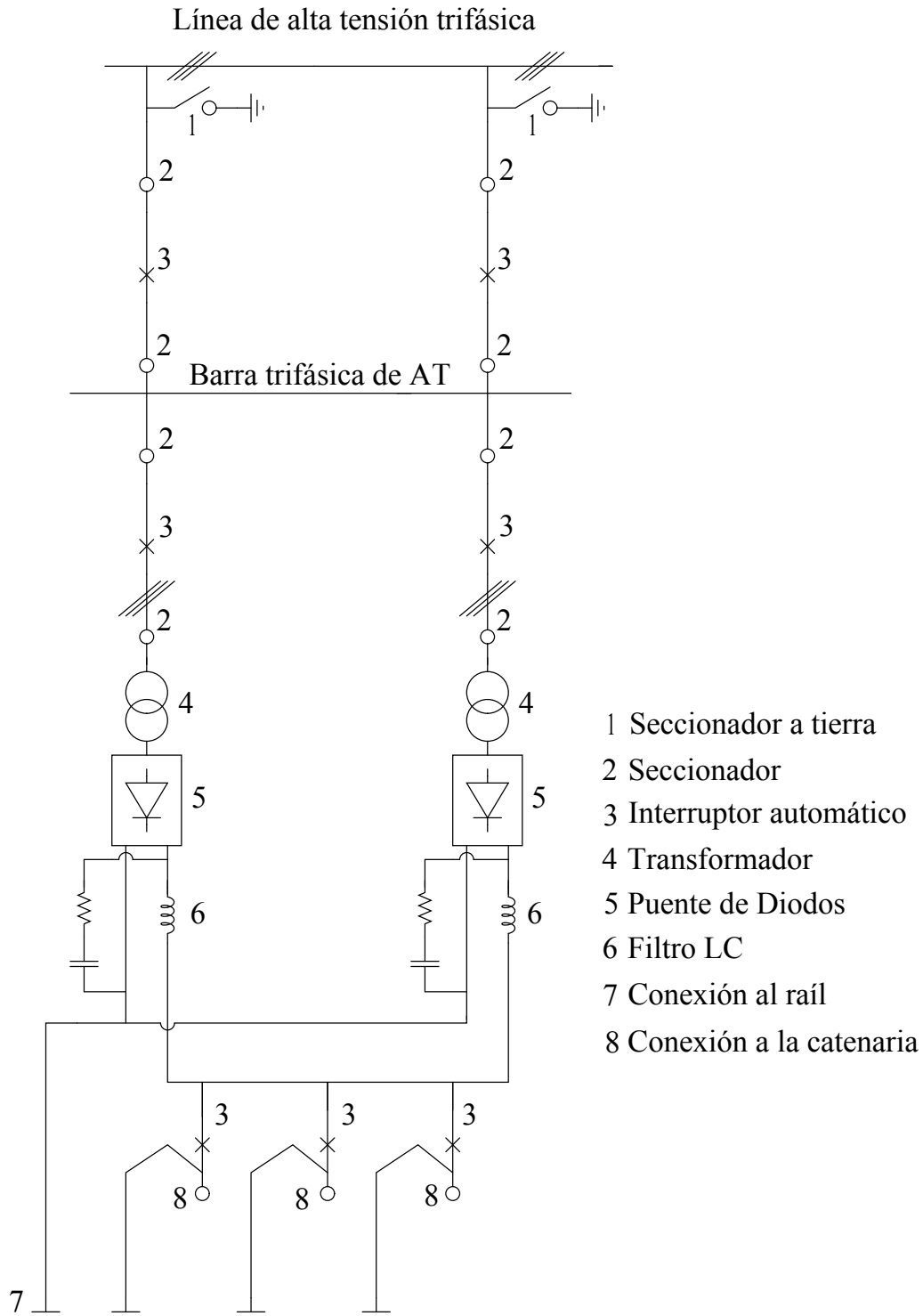
Dicho esto, el presente nivel del sistema de alimentación es quizás al que menos importancia se le da, pues realmente la diferencia entre una disposición u otra queda relegada únicamente a la continuidad del servicio, que puede verse interrumpido ante alguna falta irreversible (las cuales no son muy comunes en este ámbito). En otras palabras, el tren circulante no "va a ver" diferencia alguna entre un tramo conectado a la red eléctrica mediante una distribución en **H** y otra en **T**, y por ello dentro del ámbito de este proyecto no se invierte demasiado tiempo en elegir entre una disposición u otra.

## 2.2 Transformación y Protección

Una vez conectada la SE a la red, ésta lleva a cabo una labor de **transformación de la tensión** según el sistema empleado, para así adaptar las condiciones de la red industrial a las requeridas por el vehículo. En CC nos centraremos tanto en cambiar el nivel de tensiones como en rectificar la onda, en el sistema a CA 16'7 Hz se lleva a cabo tanto la transformación tensional como la **adaptación frecuencial** mediante diversos métodos y configuraciones, mientras que en los sistemas 1×25 y 2×25 la transformación será únicamente tensional, aunque habrá que tener en cuenta la minimización del **impacto en el equilibrio de la red**.



Para compensar la caída de tensión a lo largo de la catenaria, hoy día se dota al transformador de la SE con un secundario con cambio de tomas automático, abriendo así la posibilidad de aumentar o disminuir la tensión a placer y procurar que el tren trabaje el mayor tiempo posible bajo las condiciones de diseño.



**Figura 2.3** Diagrama típico de una SE rectificadora. Elaboración propia.

Además de la transformación, la SE se encarga de proteger a los equipos empleados, la catenaria y al tren en caso de cualquier tipo de falta o incontingencia, así como de redirigir el flujo de potencia en caso de inhabilitación de una de las líneas. Para asegurar una protección completa la SE disponen dos tipos de elementos protectivos: interruptores automáticos trifásicos, siempre ubicados aguas arriba del transformador, e interruptores monopolares de CC de alta velocidad, emplazados justo antes de la conexión de los cables de la catenaria a alimentar.

Con la aparición de la frenada regenerativa las SE de tracción asumieron otro papel: el de recibir potencia desde la catenaria para inyectarla en la red o en los dispositivos de almacenamiento disponibles, empezando a llamarse así *SE Bidireccionales*. La frenada regenerativa es bien interesante, pues permite al frenar recuperar la energía cinética ya asumida para poder volver a absorberla más tarde, aumentando considerablemente (especialmente en transporte urbano) la eficiencia del sistema. En las configuraciones basadas en CA esto no ha supuesto ningún problema significativo, en líneas generales no tiene por qué haber elemento alguno en la SE que impida el flujo bidireccional de potencia. Tal y como veremos en mayor profundidad, en la alimentación a CC sí que surgen problemas (en investigación incluso hoy día), pues los elementos rectificadores básicos no consentían un flujo invertido.

Para reducir costes fijos y el peso de la obra en el presupuesto, es una práctica común emplazar en la misma SE los equipos de alimentación de los trayectos adyacentes. De esta manera también se facilita la redirección del flujo de potencia, así como la alimentación de más de un tramo por parte del mismo transformador en caso de fallo en el sistema de suministro energético de uno de los tramos. En los sistemas de CA también se aprovecha esta disposición para reducir el desequilibrio introducido en la red industrial, conectando cada transformador a una combinación de dos fases diferente.

La importancia de esta etapa en la SE es más que notable, pues principalmente dependerá de ésta lograr el buen funcionamiento eléctrico del tren ¿Cómo? Dejando a un lado las consecuencias de una actividad fuera de los límites de tensión y frecuencia de diseño, un contenido armónico mínimo podría ocasionar un torque irregular, sobrecalentamiento en los dispositivos a bordo, y en general el deterioro del equipo. Un discurso similar se podría realizar respecto a la presencia de corrientes de cortocircuito en secuencia inversa y homopolar.

## 2.3 Sistema de Catenaria

Se considera sistema de catenaria todo lo que emana desde el arrollamiento secundario del transformador de la SE, que en resumidas cuentas es el **cuerpo que se encarga de alimentar eléctricamente al tren a lo largo de la vía**. El hecho de llamarlo catenaria no implica que el sistema emplee *siempre* un cable suspendido entre dos mástiles que adopte esta característca forma, de hecho la variedad de soluciones es amplia: un tercer raíl a tensión ubicado entre los otros dos, una plancha metálica elevada unos centímetros del suelo que acompaña a la vía (algunas líneas del metro de Milán), una serie de condensadores que recargan baterías a bordo en cada parada (Metrocentro de Sevilla), bobinas que energizan el tren mediante inducción... Hay múltiples soluciones, cada una adaptada a cada caso concreto según sus restricciones, pero este trabajo se centrará únicamente en las catenarias clásicas, ya que es sin duda alguna la configuración más empleada.



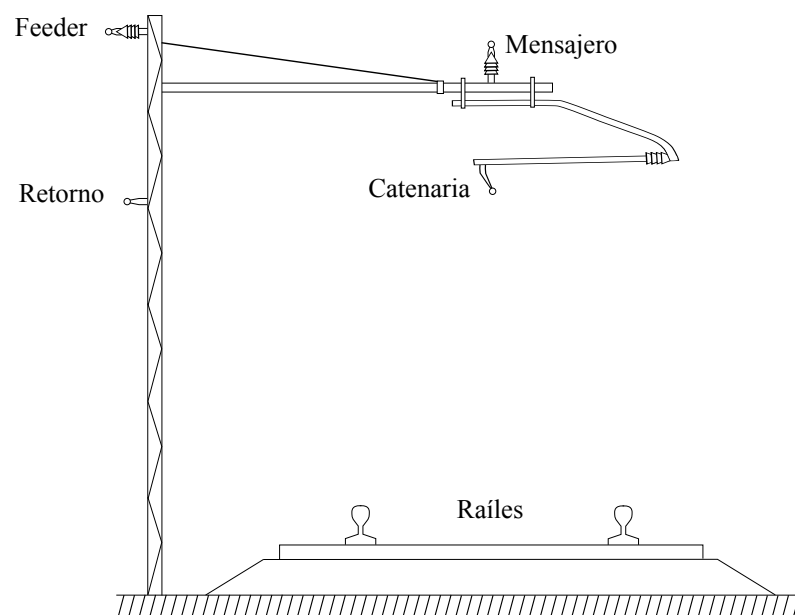
**Figura 2.4** Confluencia de catenarias en la estación de Lecco, Italia. Captura propia.

Se emplee el sistema que se emplee, el mejor posible siempre será que aquel que provoque menos pérdidas para la potencia que queremos transmitir, lo cual suele traducirse en minimizar la caída de tensión a lo largo del cable de contacto manteniendo en valor su componente activa.

### 2.3.1 Hilos y Pantógrafo

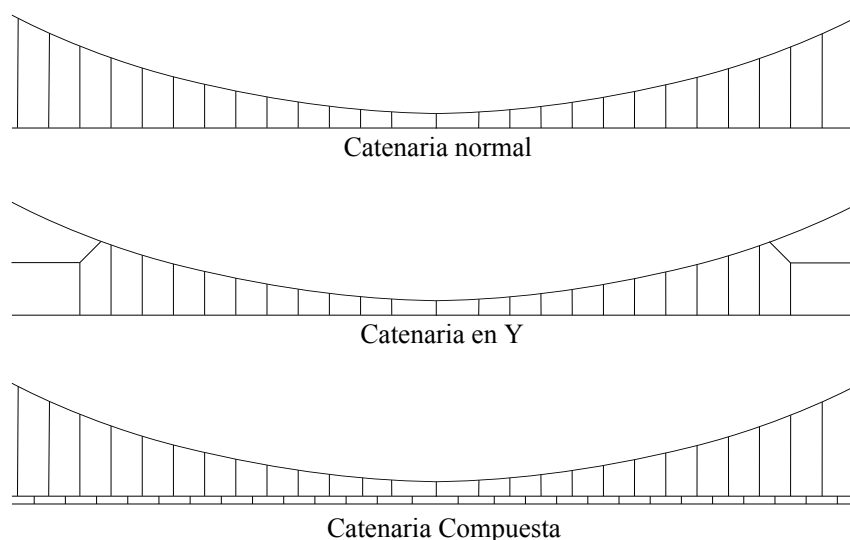
Físicamente el sistema de la catenaria está compuesto por una sucesión de mástiles (habitualmente de tipo Mannesman) que mantienen suspendidos un número de cables variable según la configuración de alimentación empleada. Los materiales utilizados suelen ser cobre, aluminio y acero, quedando este último relegado únicamente a los raíles. Habitualmente los cables a tensión se hacen con cobre, mientras que aquellos dedicados a transmisión de señales, protección ante descargas ambientales, o retorno de corriente, se realizan con aluminio ¿Por qué? La razón es sencilla, desafortunadamente el robo de cobre es algo habitual en el sector, así que para desincentivar la práctica se opta por emplear un material de peores cualidades, el aluminio, en aquellos cables cuya sustracción no supone peligro alguno (es decir, aquellos que no están a tensión), con la ventaja de que las labores de reposición serán mucho menores.

Como se ha mencionado previamente, el número de hilos en la catenaria y su disposición son variables, y esencialmente dependen del tipo de sistema de alimentación empleado. En primera instancia se pueden emplear tan sólo dos hilos en los diferentes sistemas, menos en el  $2 \times 25$ , pues es el único de todos que emplea un hilo adicional conocido como *feeder*, que alimentado a -25 kV resulta imprescindible para el funcionamiento del sistema. En cualquier caso lo habitual es contar con un mayor número de hilos para aumentar la calidad del servicio, habitualmente instalando cables para facilitar el retorno de la corriente, transmitir señales, o proteger la línea ante descargas eléctricas.



**Figura 2.5** Ejemplo de sección de la catenaria empleada para el sistema  $2 \times 25$ . Elaboración propia.

Con la intención de prolongar el buen estado del pantógrafo (recordemos, el brazo metálico del vehículo que establece el contacto con la catenaria), es una práctica habitual llevar a cabo el *staggering*, que consiste en variar en un intervalo de 20 cm horizontales el punto de contacto del cable suspendido con el mástil, lo cual confiere a los hilos una forma de zig-zag. De esta manera a lo largo del trayecto el punto de contacto pantógrafo-hilo va desplazándose, aumentando así el área dañificada por el rozamiento e incrementando de esta manera la vida útil del propio pantógrafo.



**Figura 2.6** Configuraciones habituales de catenaria. Elaboración propia.

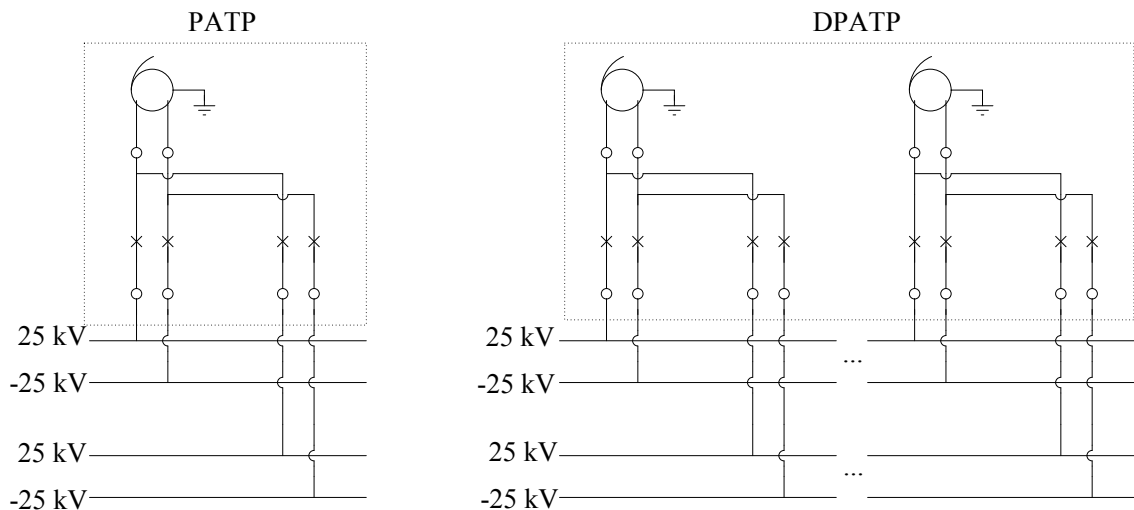
Es de vital importancia que el cable que alimenta al tren esté horizontal, pues lo contrario podría provocar el corte del mismo, un rápido desperfeccionamiento del pantógrafo y

demás daños de grave índole. A fin de lograrlo, habitualmente en lugar de emplear un solo hilo a tensión se utilizan dos: el primero se llama **mensajero** y su objetivo es procurar que el segundo, denominado paradójicamente **catenaria**, se mantenga paralelo al suelo. Esto se consigue mediante cables de longitud variable dispuestos verticalmente entre un mensajero y catenaria, tal y como muestra la figura adjunta. De esta manera, el hilo mensajero adopta una pronunciada forma similar al coseno hiperbólico, mientras que el cable catenaria permanece recto. Los cables previamente mencionados están preparados para soportar el esfuerzo mecánico asociado a sostener la catenaria, pero no para conducir la corriente de un hilo a otro; esto se realiza mediante cables dedicados que cortocircuitan mensajero y catenaria de manera frecuente a lo largo de la vía. Este sistema se puede mejorar mediante múltiples soluciones y alternativas, teniendo todas como objetivo reducir sensiblemente los esfuerzos mecánicos sufridos ante el paso del pantógrafo.

### 2.3.2 Puntos Auxiliares

Aunque pueda parecer que configuración de la catenaria sea simple y continua, debido a la necesidad de mantener un sistema seguro en cuanto a daños y continuidad del servicio, al menester de controlar el estado de operación, y al ánimo de lograr una configuración versátil y flexible, el sistema incluye múltiples puntos auxiliares, que básicamente consisten en interrupciones, instalación de protecciones y conexiones en paralelo.

Cuando el trayecto en cuestión incluye dos vías diferentes no se emplean dos SE de tracción, cada una dedicada a una vía, en su lugar lo que se hace es ir conectando periódicamente en paralelo una vía con la otra, pero únicamente utilizando una sola SE. Estos puntos de conexión paralela se llaman **PPS** (por las siglas en inglés de Punto de Alimentación en Paralelo), y adicionalmente incluyen una serie de dispositivos de protección y maniobra para facilitar labores de mantenimiento y aislar una vía de la otra.



**Figura 2.7** Conexiones PATP y DPATP. Elaboración propia.

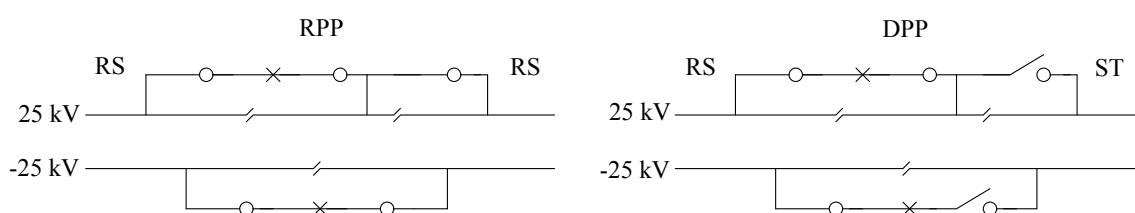
En la configuración 2×25 este enlace se explota también como punto de conexión a los AT, denominándose en ese caso **PATP** o **DPATP** (por las siglas en inglés de Punto de Paralelo y Autotransformación y Doble Punto de Paralelo y Autotransformación). La única diferencia existente entre uno y otro es que en el PATP un módulo contiene un único

AT, mientras que en el DPATP un solo módulo contiene a dos AT independientes. Dicho de otra manera, para llevar a cabo la labor de autotransformación en un puesto concreto dentro de un sistema de dos vías, se pueden emplear o bien dos PATP o un único DPATP. Si sólo hubiera una vía, caso infrecuente de cualquier modo, ambos puntos pasan a llamarse **ATP** y **DATP**.

Aunque en el diagrama no quede reflejado, estos puestos también incluyen múltiples instrumentos de medida y control, los cuales se encargan de la operación y protección ferroviaria, y que vienen alimentados por el sistema de suministro energético de los servicios auxiliares, que más tarde se tratarán en mayor profundidad.

En los sistemas de CA raramente se puede llevar a cabo la alimentación doble, lo cual es debido a que habitualmente, tal y como se verá en mayor grado de detalle, cada SE toma dos fases diferentes de la red trifásica para disminuir el desequilibrio introducido aguas arriba. Al realizar este tipo de conexión "rotativa" es imposible conectar los cables de una SE con los de la siguiente, pues se provocaría un cortocircuito. Igualmente tampoco se puede simplemente separar unos centímetros una catenaria de otra para solucionar el problema, pues al cruzar el vehículo, su pantógrafo cerraría un cortocircuito, sufriendo grandes daños. Así pues ¿qué se hace? La solución adoptada consiste en ubicar un tramo de catenaria (de tamaño similar al del tren) sin alimentar para evitar cualquier tipo de perjuicio y que la transición sea lo más suave posible. Obviamente en ese trayecto el tren no recibirá alimentación alguna.

Con el perfeccionamiento de la operación ferroviaria la solución previamente expuesta ha ido evolucionando, y para mejorar aún más el tránsito del tren se consideró la opción de energizar la catenaria neutra mientras el tren circule por ella, cesando la alimentación poco antes de que el vehículo se acercara a los hilos de la próxima SE. Para poder llevar esto a cabo se emplean los **DP** y **DPP** (por las siglas en inglés de Punto de Seccionamiento y Punto de Seccionamiento y Protección), los cuales conectan en serie los sucesivos tramos de catenaria durante todo el trayecto, no sólo abriendo la posibilidad de energizar el tramo de catenaria neutra, sino de alimentar el trayecto correspondiente a una SE inoperativa por alguna falta.



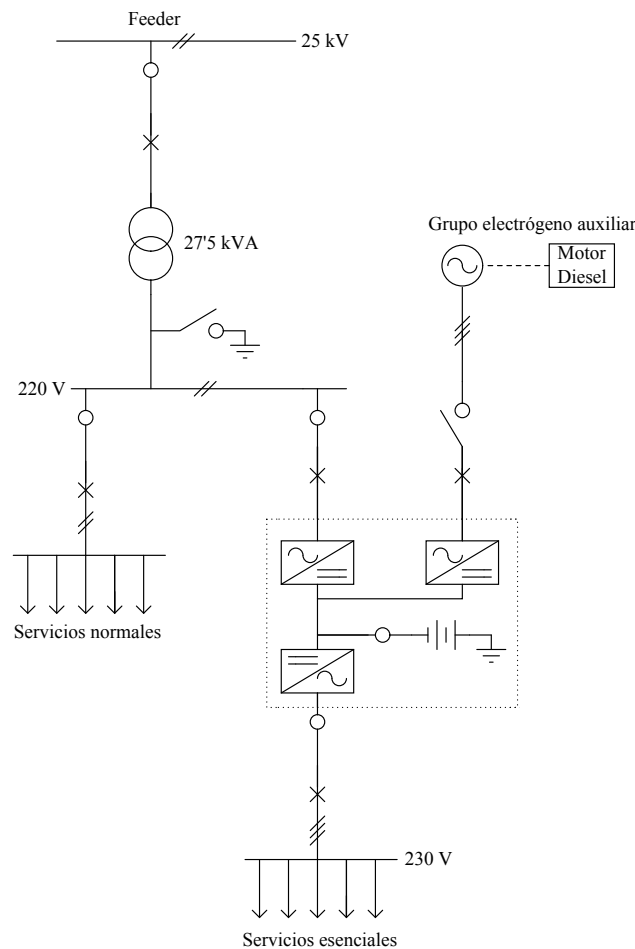
**Figura 2.8** Puntos de RPP y DPP. En la configuración mostrada la sección neutra está siendo energizada por la SE del tramo izquierdo. Elaboración propia.

En algunos casos cada vez más frecuentes los DP y DPP también se ubican dentro de un tramo de catenaria alimentado por una misma SE. La utilidad de esta práctica reside en que así se facilitan las labores de mantenimiento del sistema (así podemos aislar una sola parte del tramo en lugar de todo él) y se aumenta la seguridad de toda la red, pudiendo establecer un menor tiempo de respuesta y mayor grado de selectividad. Cuando los DP y DPP se emplean de esta manera, se pasan a llamar **RP** y **RPP** (por las siglas en inglés de Punto de Subseccionamiento y Punto de Subseccionamiento y Protección). De esta mane-

ra también se consigue incrementar el grado de flexibilidad de la red, especialmente en el caso de doble vía, pues nos abre la posibilidad de asegurar la alimentación en los sucesivos tramos ante faltas de cualquier tipo, simplemente reconfigurando las diferentes conexiones.

Otro punto importante es aquel que sirve para establecer la **alimentación de los servicios auxiliares** desde la catenaria, el cual a diferencia del resto no dispone siglas algunas para facilitar su denotación. La manera mediante la cual se suministra potencia a dichos servicios auxiliares depende completamente del sistema empleado, sea CC o CA o contemple una o dos vías. De manera general la alimentación de estos equipos se puede llevar a cabo desde la propia SE o bien desde puntos intermedios de la catenaria, llevándose siempre a cabo un proceso de rectificación de la onda para eliminar armónicos indeseables y adaptarla a los niveles tensionales requeridos (habitualmente 240V CA trifásica).

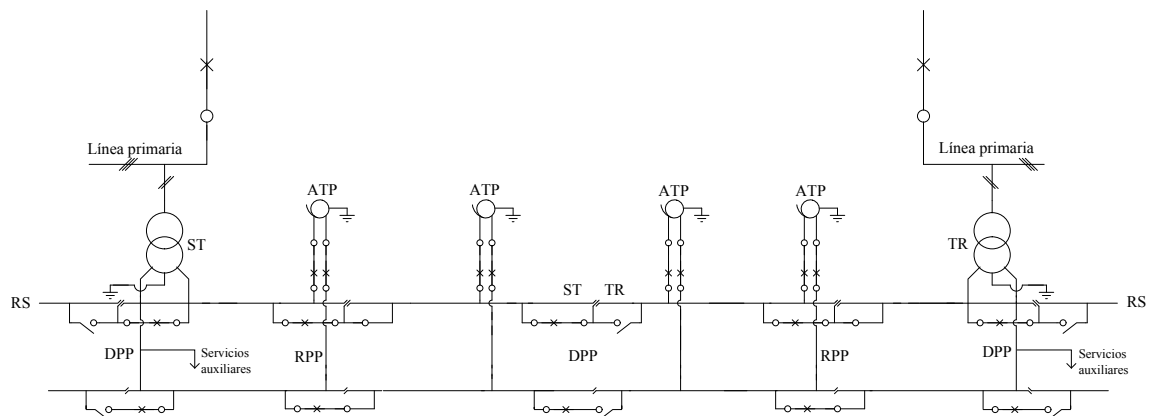
Estos servicios auxiliares suelen comprender los equipos de señalística, detonación de protecciones o control de los interruptores y seccionadores para llevar a cabo la operación ferroviaria previamente mencionada. Dicho de otra manera, la importancia de estos sistemas es alta, ya que si algún problema surgiera y no se comandara de manera adecuada la actuación de una protección, las consecuencias podrían ser magnas. Así pues, además del punto de alimentación mencionado, se suele considerar un grupo electrógeno adicional para asegurar el perenne funcionamiento de estos equipos.



**Figura 2.9** Configuración empleada en la alimentación de los servicios auxiliares en el sistema 2x25 con una sola vía. Elaboración propia.

En la figura adjunta podemos distinguir dos tipos inmediatos de servicios auxiliares: los normales y esenciales. El primer grupo puede soportar ceses en la alimentación sin que ello ponga en entredicho la seguridad del sistema. Por otra parte, el segundo grupo debe de tener alimentación de manera ininterrumpida, y por ello se facilitan tres canales diferentes de suministro de potencia: la propia catenaria del tren (concretamente el feeder para el sistema  $2 \times 25$ ), un grupo electrógeno de motor diesel, y una batería, la cual se recarga mientras los servicios esenciales funcionan alimentados por la catenaria.

A pesar de que la importancia de estos servicios es innegable, su impacto en el sistema de catenaria a nivel de potencia es ciertamente reducido. Si bien el consumo a velocidad de pico constante (tramo con mayor peso en los trayectos ferroviarios de alta velocidad) ronda en los trenes modernos los 8 MW, las necesidades de estos servicios auxiliares no alcanzan los 50 kW en las configuraciones de doble vía. Así pues, tomando el caso más desfavorable se puede asegurar que el impacto en términos de alimentación siempre será inferior al 0,7 % del consumo del tren. Por esta razón en los modelos de flujo de potencia se suele despreciar la presencia de este punto auxiliar, aunque bien habría que considerarlo en un estudio de operación ferroviaria.

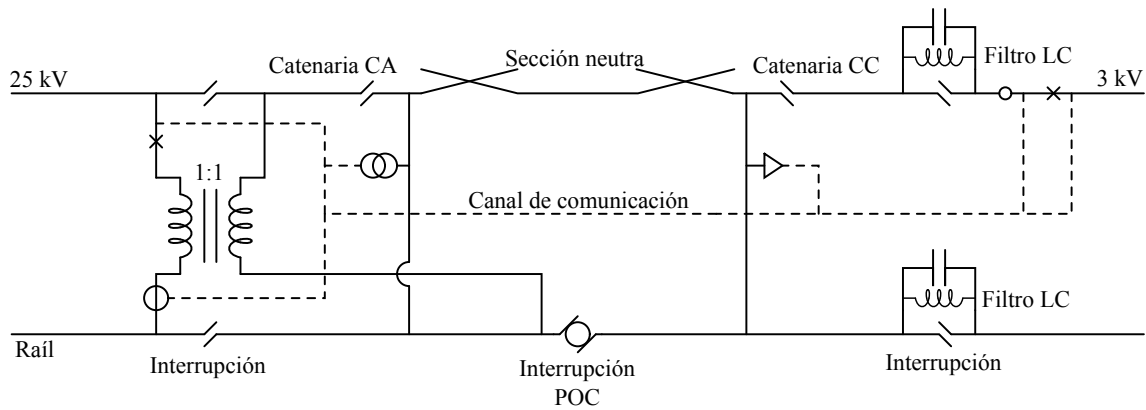


**Figura 2.10** Diagrama típico del sistema de alimentación  $2 \times 25$  de una sola vía mostrando los puntos auxiliares. Elaboración propia.

### 2.3.3 Punto de Origen de la Catenaria

Ya bien se emplee un sistema de CA para explotar una cierta línea ferroviaria, las estaciones de un mínimo tamaño utilizan CC para energizar sus inmediaciones ¿Por qué? Pues por dos motivos principales: en las estaciones coinciden múltiples líneas ferroviarias, cada una de un tipo diferente, y si bien un tren diseñado para funcionar alimentado por CA puede hacerlo igualmente con CC, al revés no es posible debido a la falta de dispositivos de transformación y rectificación de la corriente. La segunda razón atiende a que la corriente de alimentación de los sistemas de CA provocan interferencias con las señales de comunicación de CC, lo cual podría provocar gravísimos daños materiales, y peor aún, humanos, al no poder transmitir de manera correcta una orden desde la estación a un tren en circulación.

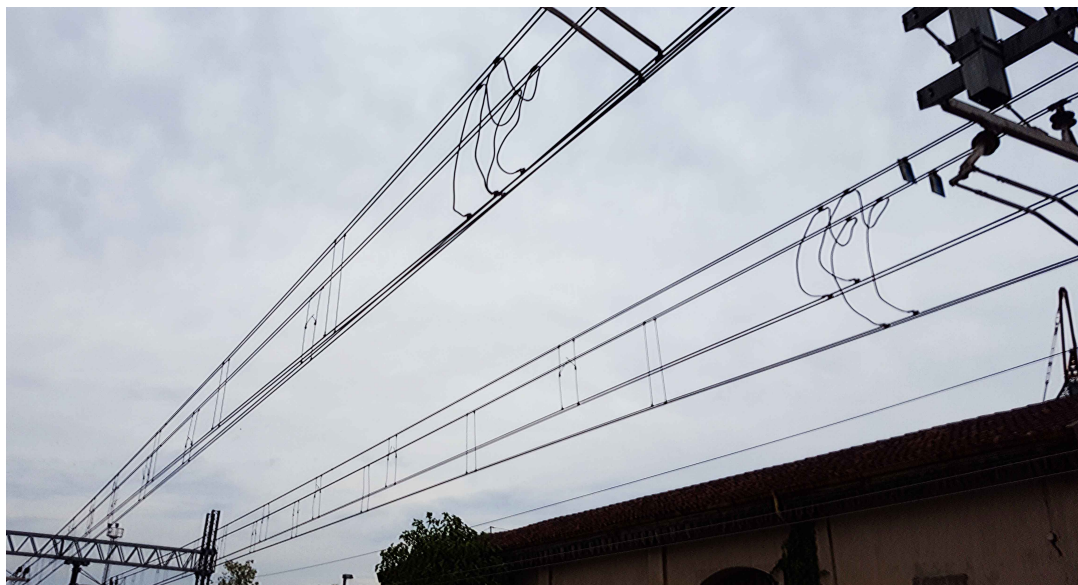




**Figura 2.11** Diagrama del tramo POC. Elaboración propia.

Así pues, para asegurar el correcto funcionamiento de cualquier tipo de vehículo en las estaciones, y para evitar problemas de comunicación, a una milla de distancia a la estación se instala el llamado **POC** (por las siglas de Punto de Origen de la Catenaria). Su importancia es magna, así que por ello se le dedica un apartado exclusivo para detallar su función y componentes.

El POC no es más que un tramo de vía alrededor de aproximadamente 2 km a lo largo del cual se instalan equipos de medida, protección, filtrado,... y más importante aún, donde el tren deja de estar físicamente en contacto con una catenaria para enlazarse a otra. Un POC tiene que estar adecuadamente diseñado para cumplir los siguientes requisitos: que el vehículo pueda hacer la transición de CA a CC sin ningún tipo de problema eléctrico, que todo el contenido armónico sea extinguido al penetrar en la zona de CC, que por los raíles no circule corriente alguna de retorno, y que al tren le de tiempo de alzar el pantógrafo de CC y bajar el de CA.

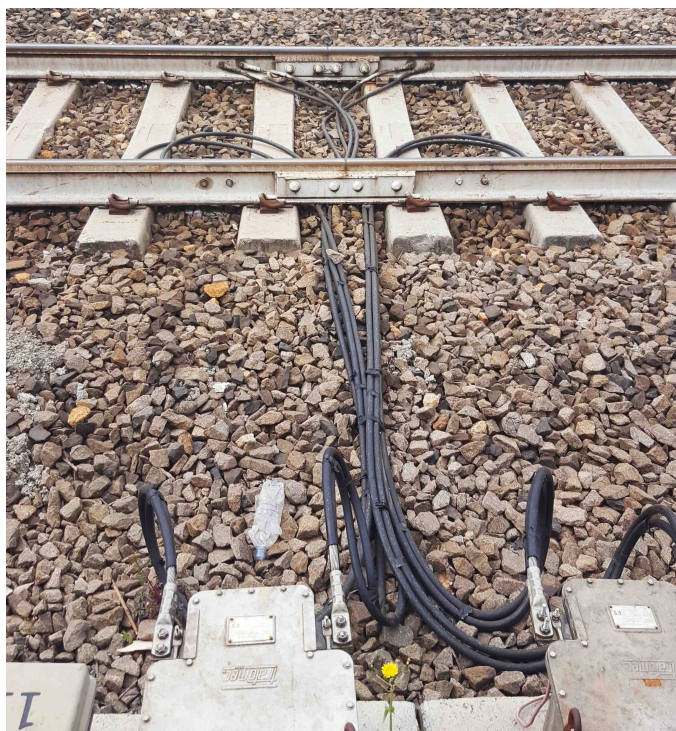


**Figura 2.12** Cambio de catenaria en las inmediaciones de la estación de Milano Bovisa, Italia. Captura propia.

Para asegurar que la transición de un lado a otro del POC se realiza adecuadamente, se instalan equipos de medida tanto de CA como de CC, los cuales están conectados mediante un sistema de relés a protecciones que saltarán en el caso de que las condiciones no sean las adecuadas en ambas partes. Tras los aparatos de medida de CA se instala un transformador de relación 1:1 con la única intención de aislar galvánicamente la catenaria. Llegados a este punto, los hilos de CA salen del trayecto y ocupa su lugar una catenaria neutra, la cual medirá lo suficiente (aproximadamente 100 m) para que, viajando a 30 km/h, el vehículo pueda recoger el pantógrafo de CA y extender el de CC. Una vez extendido el brazo metálico, la catenaria neutra sale y de igual manera se ubican sobre la vía los hilos de CC.

A fin de extinguir el contenido armónico, especialmente el fundamental de 50 Hz, justo al entrar en la zona de CC se ubican filtros LC (con inductancia de 3'5 mH y capacidad de 2895  $\mu$ F) en serie tanto en los cables como en los raíles, los cuales rompen los conductores para forzar a la corriente circular por ellos. Una práctica recomendable es conectar en paralelo al condensador del filtro otro igual de capacidad variable, pues debido a la condiciones intempestivas el filtro capacitivo va perdiendo sus propiedades, así que de esta manera podemos compensar gradualmente el desperfeccionamiento.

Todos los aspectos y elementos previamente listados quedan oportunamente reflejados en el diagrama adjunto. Las capturas presentes igualmente se añaden con la intención de ilustrar cómo estas conexiones se hacen en realidad.



**Figura 2.13** Interrupción de los raíles y conexión a filtros en las inmediaciones de la estación Milano Bovisa, Italia. Captura propia.

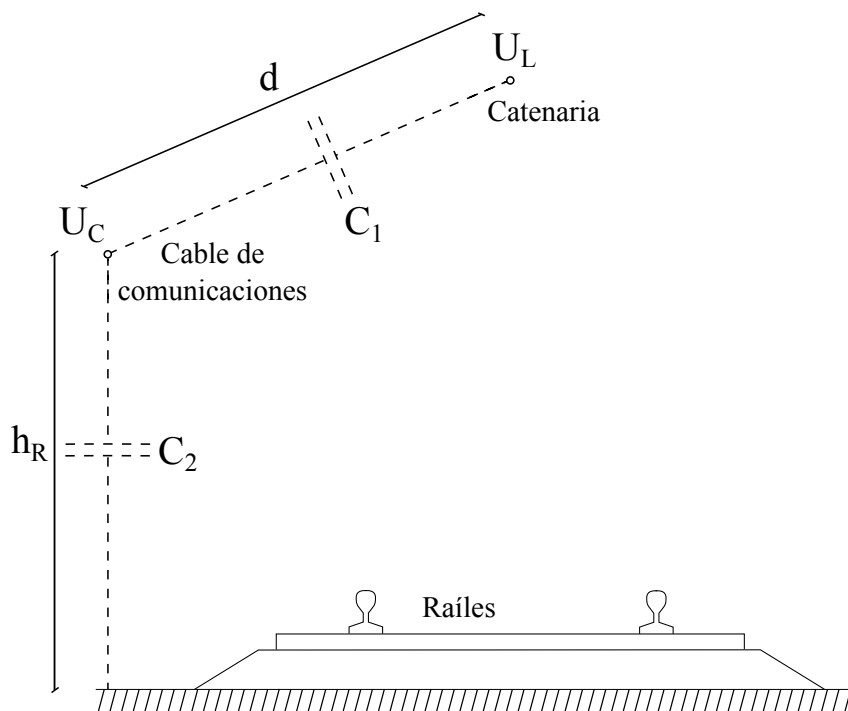
Por último, para interrumpir la circulación eléctrica por los raíles, e igualmente minimizar la corrosión provocada por las *Stray Currents*, el raíl se rompe intencionadamente hasta en tres ocasiones, siendo la más importante de todas aquellas la llamada Interrup-

ción POC, que no es más que unos centímetros de un plástico muy aislante que aguanta el estrés mecánico habitual en los raíles y extingue casi toda la corriente circulante por los mismos. Habitualmente esta Interrupción POC se instala justo en el centro de la sección neutra.

### 2.3.4 EMI y Stray Currents

Bien se sabe que por el mero hecho de que un cable esté a cierta tensión se produce una perturbación en los cuerpos de los alrededores (especialmente en aquellos metálicos), habitualmente denominada **EMI** (por las siglas en inglés de Interferencia Electromagnética). Esto es hoy día fácilmente modelable, gracias a la teoría de líneas desarrollada, mediante un condensador conectado entre los dos cuerpos en cuestión, a lo que se le suele llamar "capacidad mutua". Dicho efecto se acentúa en sistemas poblados de cables cercanos a diferente nivel tensional, como es el ferroviario en todas sus versiones, por lo que es un aspecto al cual se le dedica tiempo y esfuerzo en conocer y mantener bajo control.

A lo largo del recorrido este problema se minimiza alejando los cables unos de otros (especialmente el de comunicación), poniendo a tierra periódicamente los raíles mediante un filtro de paso bajo (a continuación se verá por qué) y cortocircuitando las diferentes partes que deben estar en el mismo estado tensional. Esta solución es efectiva y sencilla, pero tiene un gran problema: no siempre se puede aplicar, por ejemplo en los túneles. Como resulta obvio para el lector, en un túnel todas las distancias se reducen de manera más que sensible, por lo que recurriendo al modelo previamente mencionado, la influencia eléctrica entre los cables se dispara al reducirse la capacidad mutua. Ante este escenario lo que se suele hacer es revestir los cables más importantes (aquellos de comunicación y de accionamiento de protecciones) de material aislante, lo cual como no puede ser de otra manera aumenta el coste de la vía.



**Figura 2.14** Esquema de las EMI en un sistema simple de un cable. Elaboración propia.

$$U_C = U_L \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} \approx U_L \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad ; \quad Q = C_1 \cdot (U_L - U_C) = C_2 \cdot U_C$$

Igualmente relacionado con la interferencia debido a la corriente eléctrica, hay otro fenómeno perjudicial en el que se invierte tiempo y dedicación a fin de minimizarlo, que no es otro que las corrientes parásitas de retorno por tierra o **Stray Currents**. Dichas corrientes, además de causar interferencias, provocan corrosión y efectos inductivos en los cuerpos metálicos adyacentes, lo cual puede llegar a ser un problema de envergadura más que considerable.

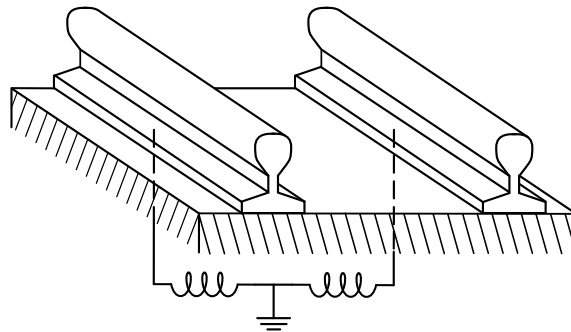
Cuando la corriente de retorno circula por los raíles puede darse el fenómeno de que abandone los mismos para viajar en su lugar por tierra. En primera instancia este comportamiento no debería suponer problema alguno, pero cuando en su camino la corriente encuentra un objeto metálico ajeno al sistema de la catenaria, se dan varios efectos perjudiciales a tener en cuenta. El primero de todos es la corrosión que se produce por la circulación eléctrica, especialmente en la zona del cuerpo metálico en la que la corriente abandona el mismo. El segundo efecto perjudicial es que la circulación de corrientes eléctricas por estructuras malladas adyacentes (acero del hormigón armado de los túneles, puentes,...) puede dar lugar a efectos de resonancia, que terminen deteriorando a la misma y provocando serias interferencias en los sistemas de comunicación.



**Figura 2.15** Efectos de corrosión debido al tránsito de corriente eléctrica en una viga de acero. Fuente [6].

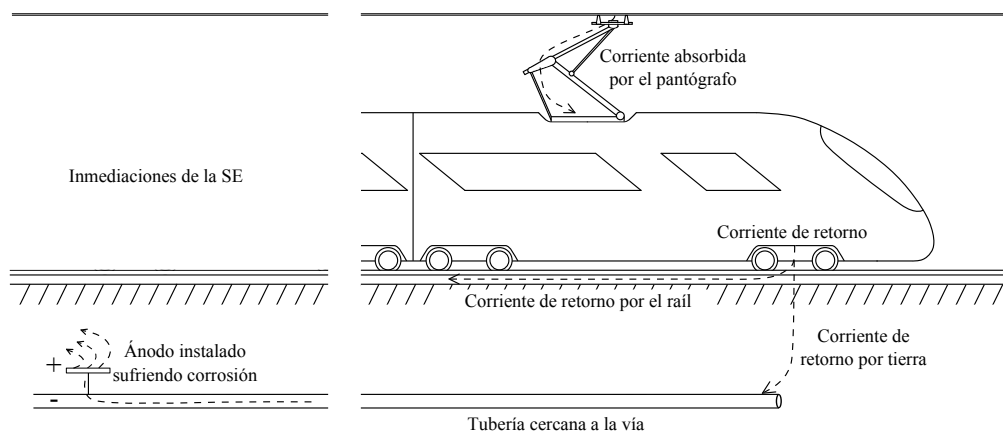
Habitualmente el método empleado para afrontar estos problemas es una combinación de medidas activas y pasivas. En primer lugar lo que se hace es procurar aislar los raíles de tierra y que la distribución de corrientes sea lo más paritaria posible, lo cual se lleva a cabo mediante bloques de cemento o madera y filtros de paso bajo, llamados IB (por las siglas en inglés de Enlaces Impedantes), para anular el contenido fundamental de 50 Hz, que al

fin y al cabo es el más importante. Desgraciadamente esta medida no es suficiente, pues la acumulación de polvo y los efectos meteorológicos terminan facilitando la fuga a tierra, por lo que no queda otra que actuar sobre los cuerpos objeto del desperfecto. Muchas soluciones diferentes se han desarrollado que actúen sobre el agente perjudicado, quizás hoy día la práctica más extendida sea disponer puestas a tierra francas periódicas y cortocircuitar las diferentes partes entre sí para disminuir el gradiente eléctrico a lo largo de la estructura perjudicada, pero la medida que ha terminado siendo más efectiva es aquella que conecta una batería entre el objeto metálico afectado y un ánodo que disponemos nosotros, concentrando así la corrosión en dicho ánodo, cuya importancia es nula. El inconveniente de esta solución es que requiere de cierto mantenimiento, a la hora de reemplazar tanto el ánodo como la batería una vez las cualidades de ambos no sean suficientes.



**Figura 2.16** Diagrama de un IB. Elaboración propia.

Dicho todo esto, de manera general las soluciones pasivas y más simples suelen ser suficientes para aplacar dentro de límites razonables los problemas aquí expuestos, pero ciertamente en algunos tramos del trayecto se requieren métodos más avanzados, igualmente descritos previamente. Estas zonas vulnerables suelen ser áreas urbanas o túneles, donde las distancias se reducen y la presencia de agentes externos se dispara. La implantación de estas soluciones activas implica también una alteración sensible de los parámetros eléctricos que caracterizan la catenaria, por lo que se requiere un trato diferente al del resto del trayecto.

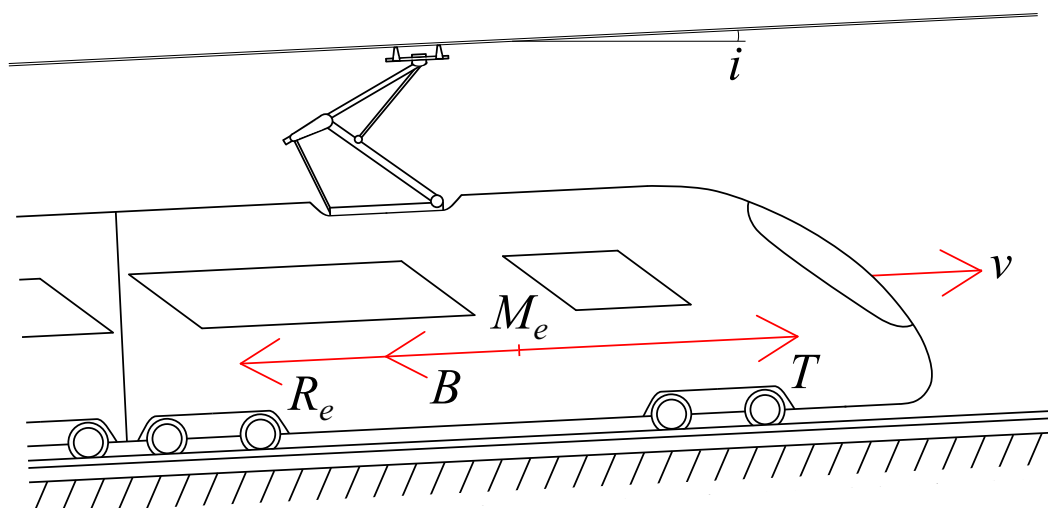


**Figura 2.17** Retorno de la corriente por tierra en presencia de un ánodo como solución activa. Elaboración propia.



## 2.4 Operación Ferroviaria

Finalmente se cierra el capítulo de generalidades tratando los fundamentos de la operación ferroviaria, que no es más que el comportamiento de la locomotora a lo largo del trayecto, y las diferentes etapas mecánicas por las que pasa. Para tratar adecuadamente la **curva de consumo**, que tan importante es para el sistema de alimentación, es necesario hacer primero un breve análisis mecánico del convoy.



**Figura 2.18** Principales variables del sistema dinámico del tren. Elaboración Propia.

En la figura adjunta aparecen simplificados los esfuerzos a los que se puede someter la locomotora y el convoy en general:  $T$  tracción creada por la locomotora,  $B$  fuerza de frenada, y  $R_e$  la resistencia equivalente. Igualmente aparecen otras variables de importancia para el análisis, como lo son la velocidad  $v$  del convoy, su masa equivalente  $M_e$  y la pendiente de la calzada  $i$ . La resistencia equivalente mencionada es el compendio de, siempre de manera simplificada, todos los efectos resistivos a los que tiene que hacer frente el vehículo, eso es:  $R_r$  resistencia a la rodadura,  $R_c$  resistencia en curvas,  $R_s$  resistencia en el arranque,  $R_i$  resistencia en cuestas y  $R_t$  resistencia en túneles. No se va a profundizar en el origen de estas fuerzas, pues bien no es el objeto de este documento el estudio de los fenómenos que acontecen en la locomotora. Lo que sí se hará es aplicar la Tercera ley de Newton al sistema del convoy, lo cual es necesario para obtener la curva de consumo típica:

$$R_e = R_r + R_c + R_s + R_i + R_t$$

$$T(v) - R_e(v, i, r) - B(v) = M_e \cdot \frac{dv}{dt}$$

Según los valores que toman  $B$  y  $T$  se pueden definir tres zonas de operación: en la primera la locomotora consume potencia, que es la fase más habitual de las tres y en la que  $T > 0$  y  $B = 0$ , después estaría el denominado *coasting* donde tanto  $T$  como  $B$  valen cero, y final-

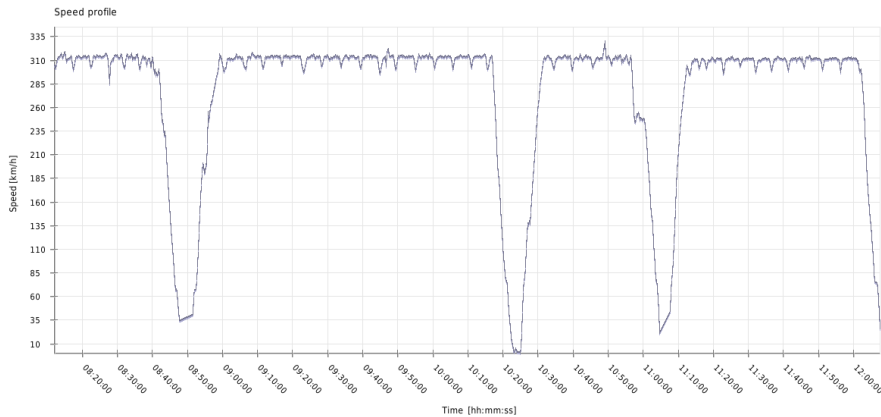
mente se tendría la cesión de potencia en la que  $T=0$  y  $B>0$ . Habría una última situación teórica en la que tanto  $T$  como  $B$  son mayores que cero, pero obviamente técnicamente no procede.

**Tabla 2.1** Fases del trayecto entre dos paradas. Elaboración propia.

Régimen	Esfuerzos	Velocidad	Aceleración
Aceleración	$T>0$ $B=0$	$v < v_{pico}$	$a_{max}$
Alcance $v_{pico}$	$T>0$ $B=0$	$v \leq v_{pico}$	$a \leq a_{max}$
<i>Free Running</i>	$T>0$ $B=0$	$v \approx v_{pico}$	$a = 0$
<i>Coasting</i>	$T=0$ $B=0$	$v \leq v_{pico}$	$a < 0$
Frenada	$T=0$ $B>0$	$v < v_{pico}$	$a < 0$

Ecuaciones en mano ya se está en grado de analizar las diferentes fases que atraviesa el tren entre parada y parada, que son las siguientes: aceleración, alcance de  $v_{pico}$ , *free running*, el ya mencionado *coasting*, y finalmente la frenada. Cada fase conlleva un consumo de potencia, yendo de mayor a menor según evoluciona el trayecto, llegando a ceder una gran cantidad de potencia en la fase de frenada (obviamente sólo si el freno regenerativo ha sido instalado). Cabe destacar que habitualmente en la fase de alcance de  $v_{pico}$  se produce un aumento logarítmico de la velocidad y una disminución hiperbólica de la aceleración, debido principalmente a razones de regulación del flujo magnético en el motor.

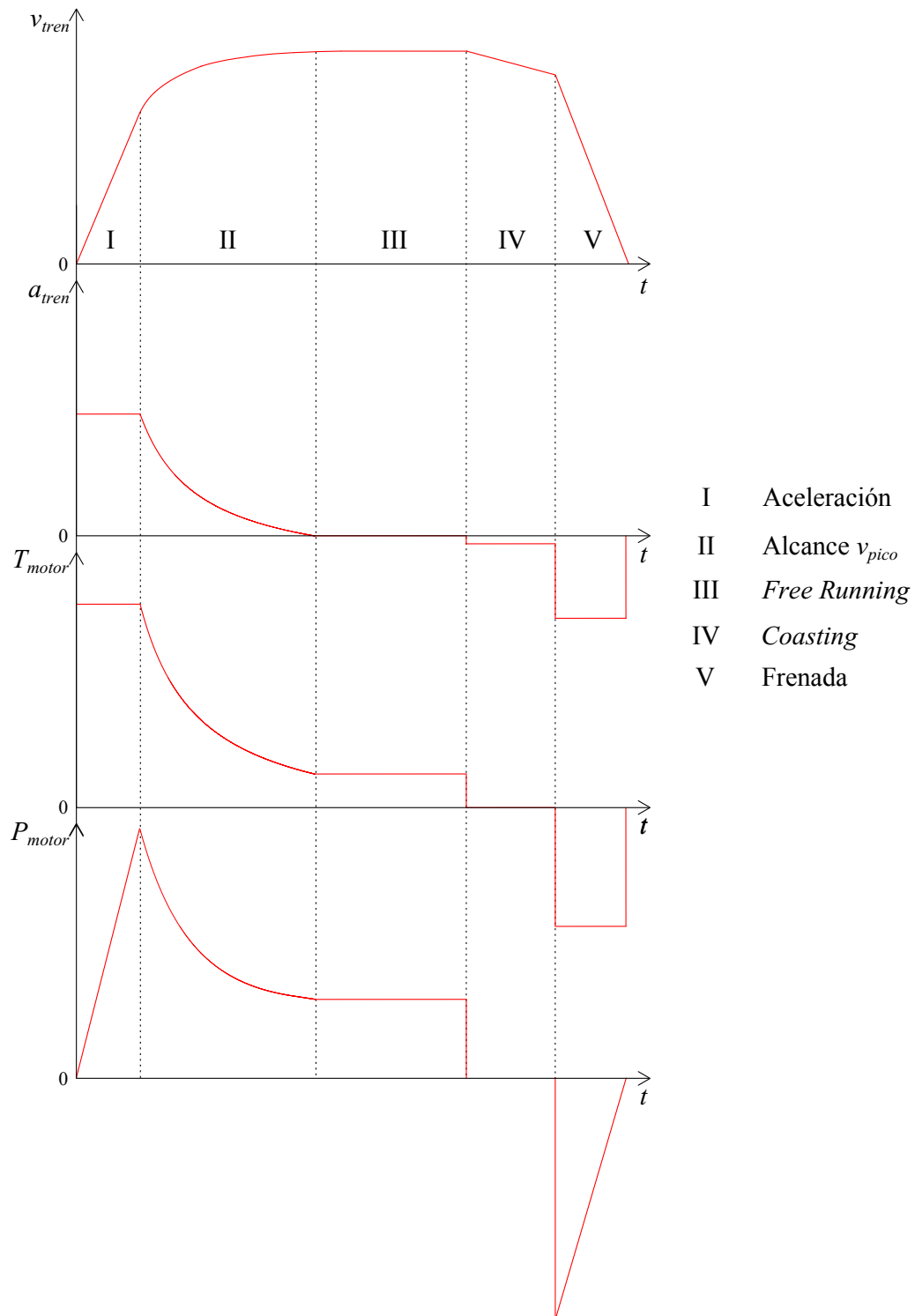
Que decir tiene que las etapas previamente descritas hacen referencia al ámbito general del recorrido, es decir, a lo largo del trayecto el tren se verá en múltiples ocasiones en la necesidad de variar su velocidad, lo cual no implica que abandone una fase u otra. Así pues para acercar lo descrito a la realidad, a las curvas descritas habría que añadirle cierto "ruido" para incluir así las variaciones transitorias de velocidad y aceleración.



**Figura 2.19** Curvas de velocidad de un trayecto real de alta velocidad. Fuente: [6].

Cada una de las fases previamente mencionadas tiene un impacto en la potencia intercambiada entre la locomotora y el sistema de catenaria, como no podía ser de otra manera. En la primera fase de aceleración constante el tren realizará el mayor consumo de potencia, para más tarde ir reduciendo gradualmente su demanda hasta alcanzar un valor estable durante la fase de *free running*. Una vez terminada dicha etapa la potencia se reducirá a cero mientras dure el *coasting*, para finalmente alcanzar acentuados valores negativos (nunca

de igual valor que los de la zona de aceleración por problemas de disipación de potencia) durante la frenada. Así pues, desarrollando todos los conceptos previos, podemos deducir cualitativamente la forma de las siguientes curvas simplificadas de velocidad y aceleración del tren y torque y potencia del motor empleado:



**Figura 2.20** Aspecto cualitativo de las curvas de velocidad, aceleración, torque y potencia. Elaboración propia.



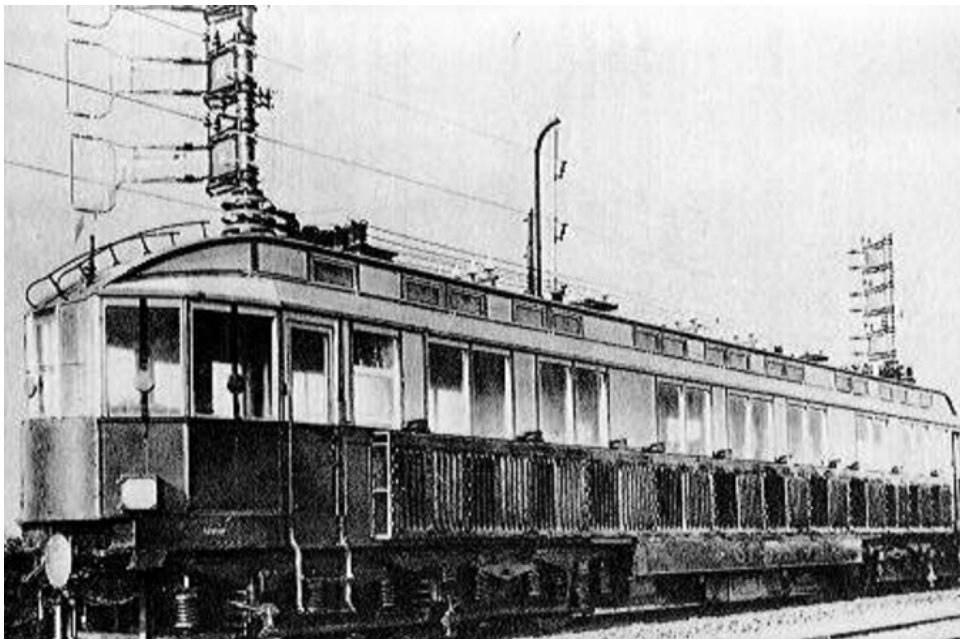
Como conclusión a este apartado se puede afirmar que los trenes son el tipo de carga que ningún controlador quiere en su red, es decir, tienen valores de pico más que pronunciados (recuerde, la potencia típica en *coasting* es de 8 MW), son muy irregulares, y lo mismo consumen potencia que la inyectan en la red. Este hecho es de magna importancia para el sistema de alimentación, ya que éste debe de ser suficientemente robusto como para hacer frente a estos cambios súbitos manteniendo las adecuadas condiciones de tensión y frecuencia. Igualmente relevante es este aspecto en el impacto que tiene la proyección de una línea ferroviaria y su inserción en la red de transporte, con la consiguiente sensible disminución de calidad del servicio que puede implicar.



### 3 Particularidades de los Sistemas de Alimentación

---

Tal y como se adelantó en capítulos anteriores hay diversos sistemas para energizar y configurar el sistema de alimentación, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Debido a razones históricas la cantidad de sistema existentes es casi igual a la de países con temprana evolución ferroviaria, pero ciertamente con el paso del tiempo sólo las configuraciones más eficientes y extendidas sobrevivieron, imponiéndose así los sistemas monofásicos y de corriente continua al obsoleto enfoque trifásico, del cual quedan algunas fotos de su curioso pantógrafo de tres brazos.



**Figura 3.1** Locomotora trifásica desarrollada por AEG en 1903. Fuente [7].

Así pues, en lo respectivo a los sistemas predominantes hoy día en Europa, se podría hacer una primera clasificación en tres grupos, tomando como criterio divisor la frecuencia utilizada en cada configuración. Por un lado se tendría la alimentación en CC (frecuencia 0 Hz, podríamos decir), explotada habitualmente a 3000, 1500 y 750 V en media distancia,

ambientes urbanos y estaciones. El siguiente a considerar sería el de 16'7 Hz, empleando principalmente en los países sajones y nórdicos debido a razones históricas, habitualmente combinado con una tensión de 15 kV. El último grupo englobaría los sistemas a frecuencia industrial, conocidos como 1×25 y 2×25: mientras que el primero emplea un solo cable a 25 kV, el segundo hace uso de un *feeder* a -25 kV junto a una serie de AT a lo largo de la vía, como el lector ha podido ver en anteriores páginas.

### 3.1 Alimentación a Corriente Continua

Es técnicamente el sistema más simple de todos, pero también es el más **limitado en cuanto a transmisión de potencia**, por lo que queda relegado a aplicaciones urbanas (tranvía, trolebús, metro,...) o a trenes regionales de baja velocidad. Tal y como fue adelantado en capítulos anteriores, la importancia de este sistema va más allá de los niveles de transporte mencionados, ya que es la configuración empleada para alimentar a los trenes en las estaciones, recuerde, por los dos siguientes motivos: compatibilidad universal de la configuración de alimentación a CC con cualquier locomotora, y problemas de interferencia y ruido entre la corriente absorbida por el pantógrafo de una locomotora a CA y el sistema de comunicación de CC.



**Figura 3.2** Tranvía de la Azienda Trasporti Milanesi empleando un sistema de CC a 1500V. Captura propia.

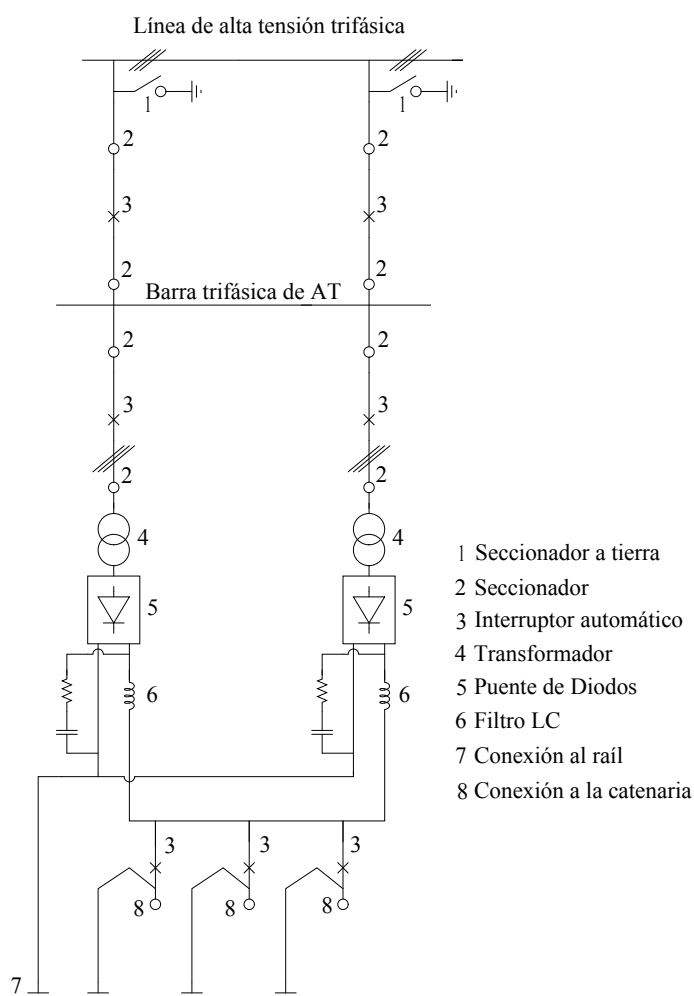
Su origen se remonta a los inicios de la electrificación ferroviaria, cuando se empezaron a probar los primeros sistemas trifásicos de alimentación. Debido a los múltiples problemas que acarreaba este planteamiento, la cantidad de defensores del sistema a CC fue aumentando: si bien el enfoque trifásico requería de un triple pantógrafo, al de CC le bastaba con un único brazo, y ciertamente las limitaciones de transmisión de potencia no representaban un inconveniente en aquel entonces, ya que las locomotoras tenían un poder mucho más reducido.

Para conocer en mayor profundidad técnica el presente sistema se propone al lector

realizar primero una revisión de la SE rectificadora y los diferentes aspectos relacionados con la misma. Tras ello se procederá a evaluar la caída de tensión a lo largo de la catenaria según las diferentes combinaciones posibles que ofrece este enfoque.

### 3.1.1 La Subestación Rectificadora

Como ya se vio en el apartado de generalidades, la conexión de la SE a la red no despierta interés ni dificultad alguna, por lo que toda atención se centra dentro de la propia SE y los procesos que se llevan a cabo dentro de la misma. A diferencia de lo que ocurre en el resto de sistemas, en este caso se lleva a cabo una rectificación completa de la corriente, lo cual tiene importantes repercusiones en términos de equipos necesarios, calidad de la onda y transmisión bidireccional de la potencia.



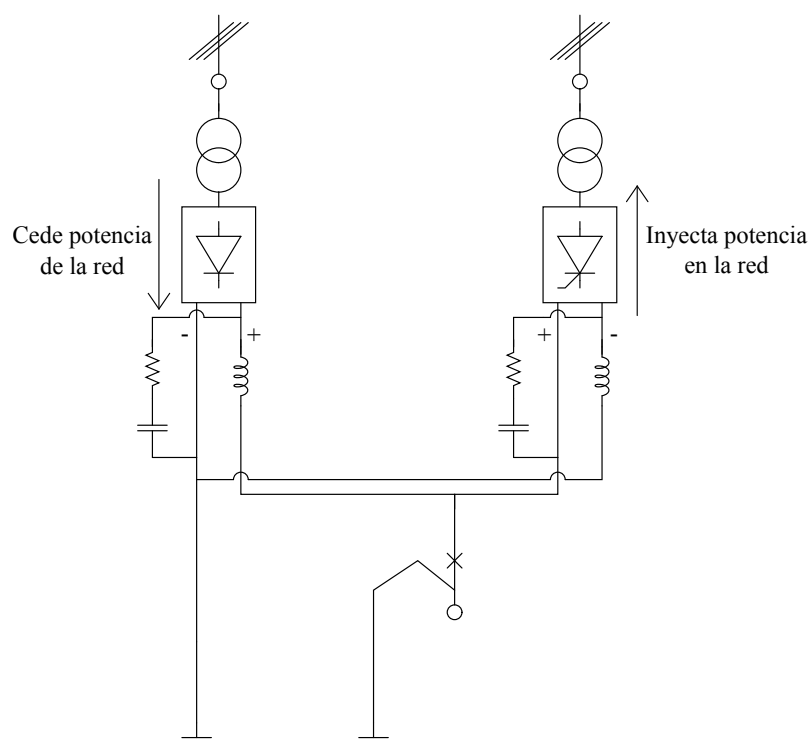
**Figura 3.3** Diagrama típico de una SE rectificadora. Elaboración propia.

Esta labor de rectificación se llevaba a cabo antiguamente mediante los ahora obsoletos rectificadores de arco de mercurio, pero bien el desarrollo de la electrónica sustituyó esta arcaica tecnología con presteza por los puentes trifásicos de diodos. Tras dichos puentes era necesaria la instalación de filtros LC para aumentar la calidad de la onda, pues el contenido armónico no es precisamente despreciable. De esta manera se conseguía el objetivo de

obtención de una onda plana y limpia, pero el avance tecnológico trajo consigo nuevos desafíos a superar.

La aparición de la frenada regenerativa (recuerde, proceso mediante el cual el vehículo devuelve potencia a la red al accionar el freno) creó la necesidad de desarrollar las llamadas **SE Bidireccionales**, que permitieran inyectar potencia proveniente de los trenes en la red, lo cual como bien se sabe no es posible mediante el puente de diodos convencional. La temprana solución que se le dió al problema era bien tosca, pues consistía en instalar dos transformadores donde había uno sólo. El primer transformador tendría la misma configuración que aquel primitivo, teniendo tras él un puente de diodos sin cambio alguno, y funcionaría en aquellos períodos en los cuales el tren absorbiera potencia. Por otra parte, el segundo transformador tendría conectado a sus arrollamientos un puente de tiristores dispuesto en sentido opuesto a aquel de diodos, que al trabajar como inversor permite así el retorno de potencia a placer a la red.

A todas luces esta solución no era óptima ni satisfactoria, pues para abrir las puertas a la frenada regenerativa duplicaba el grueso de los equipos de la SE, y para más inri el flujo de potencia fruto de esta combinación era muy variable y cuanto menos deseable. En cualquier caso esta solución se mantuvo de alguna forma u otra hasta que los IGBT se convirtieron en una solución comercial viable. Así pues, las SE bidireccionales de hoy día únicamente emplean un solo puente de IGBT, los cuales superan en todos los sentidos a los diodos, permitiendo además una suave transmisión de potencia en ambos sentidos.



**Figura 3.4** Primer concepto de SE bidireccional. Elaboración propia.

En cualquier caso cabe destacar que incluso hoy día la tecnología de la frenada regenerativa y la SE bidireccional sigue estando bajo investigación y desarrollo, siendo hoy día reducido el número de estaciones que explotan completamente esta tecnología.

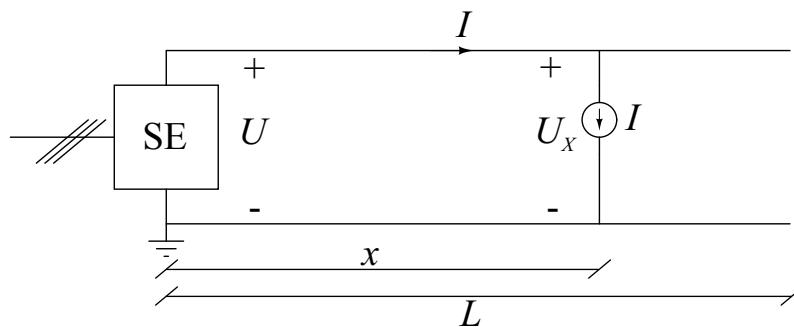
### 3.1.2 Sistema de Catenaria

La energización de la catenaria en este sistema es sustancialmente más simple que en el resto de enfoques, pues tal y como fue mencionado previamente en CC no hay necesidad alguna de disponer de secciones neutras ni cambios de fase, por lo que la alimentación doble es una posibilidad abierta. A continuación se considerarán los casos más comunes de energización, y llevaremos a cabo un simple análisis general para poder comparar los resultados que nos ofrecen en cuanto a tensión de contacto se refiere.

Se ha decidido incluir el apartado que nos ocupa y sus cálculos relativos en el trabajo presente por los siguientes motivos: por una parte, como ya sabrá el lector por la información ya adquirida, los sistemas  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$  no pueden conformar un trayecto en su plenitud tal y como está planteada la red ferroviaria hoy día, por lo que bien útil resulta estar familiarizado con los perfiles de tensión y aspectos técnicos relativos a la configuración de CC; además, realizando este análisis de cálculo en la catenaria a CC podremos ahorrarnos el respectivo a CA, ya que si bien los perfiles son análogos (aunque con mejores resultados, tal y como veremos) la obtención de los mismos puede resultar significativamente más compleja.

Para realizar una oportuna comparación entre las diferentes configuraciones existentes, se consideran las siguientes variables:  $U_C$  será la hipotética tensión de contacto a lo largo de toda la catenaria,  $\Delta U$  la caída de tensión entre la SE y dicho punto,  $U_{min}$  la mínima tensión de contacto posible,  $\Delta u$  la caída de tensión media a lo largo de la catenaria, y  $U_x$  el perfil de tensiones correspondiente a un tren ubicado a una azarosa distancia  $X$  de la SE, siendo  $U_X$  su propia tensión de contacto.

La primera disposición a considerar es la llamada **alimentación en punta**: de una única SE emana la catenaria a través de la cual se alimenta el vehículo. Para llevar a cabo los cálculos suponemos una SE que produce una tensión  $U$  justo a su salida, alimentando una locomotora modelada como una fuente de intensidad de valor  $I$  ubicada a una distancia  $X$ , siendo  $U_X$  la tensión en bornes de la misma.



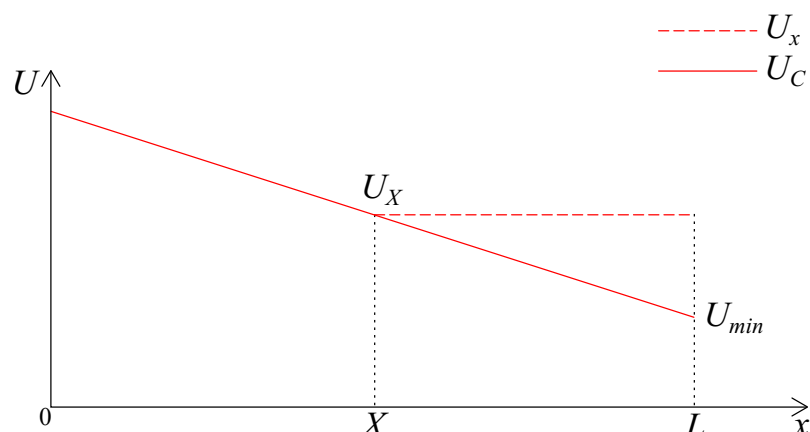
**Figura 3.5** Diagrama de alimentación a CC desde un solo extremo. Elaboración propia.

Ciertamente el circuito correspondiente a resolver es bien simple, bastan los conocimientos adquiridos en Teoría de Circuitos para obtener las variables de interés. Tomando  $r$  como resistencia por unidad de longitud del cable empleado (despreciando la resistencia de retorno), obtenemos las siguientes expresiones:

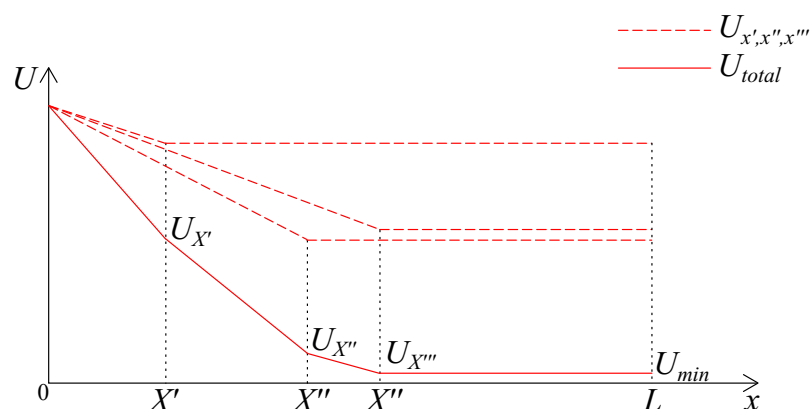
$$U_C = U - \Delta U \longrightarrow U_C = U - r \cdot x \cdot I$$

$$U_{min} = U - \Delta U_{max} \longrightarrow U_{min} = U - r \cdot L \cdot I \quad ; \quad \Delta U_{max} = r \cdot L \cdot I$$

$$\Delta u = \frac{1}{L} \int_0^L I \cdot r \cdot x \cdot dx \longrightarrow \Delta u = \frac{1}{L} \cdot \frac{I \cdot r \cdot L^2}{2} \longrightarrow \Delta u = \frac{r \cdot L \cdot I}{2}$$



**Figura 3.6** Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación a CC desde un solo extremo. Elaboración propia.



**Figura 3.7** Perfiles de tensiones individuales y superpuesto resultantes de la alimentación de tres trenes a CC desde un solo extremo. Elaboración propia.

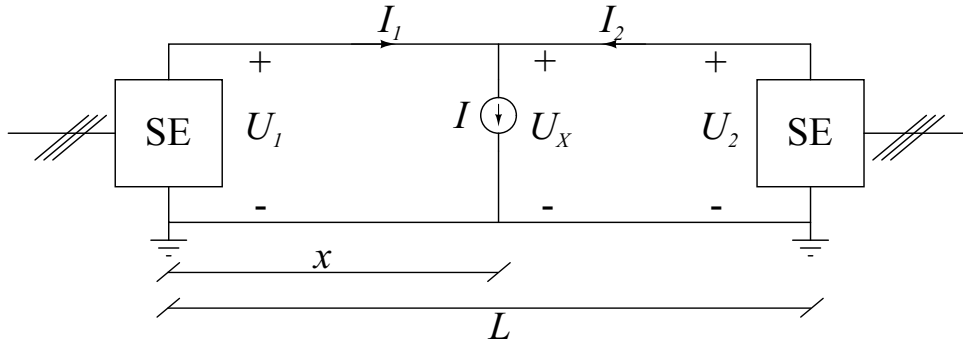
A la vista está que la forma adoptada por el perfil de tensiones es muy simple: desde la SE hasta  $X$ , la posición del tren, la tensión descenderá de manera lineal, y una vez superado dicho punto se mantendrá constante al no circular más corriente por la catenaria. Cuando hay más de un vehículo circulando a través del mismo tramo se da un efecto de superposición, que no es más que la suma de las caídas de tensión provocada por cada locomotora. En la gráfica adjunta se muestra el perfil correspondiente al escenario en el



que tres trenes dentro del mismo tramo consumen diferentes potencias.

A partir de este punto se utilizarán estos valores obtenidos para realizar la comparación con el resto de configuraciones.

El segundo caso a tratar es el de **doble alimentación**, el cual a decir verdad es bastante más común que el anterior: el tren circula en contacto con una catenaria la cual es energizada desde ambos extremos por dos SE diferentes, una alimentando a tensión  $U_1$  y la otra a  $U_2$ .



**Figura 3.8** Diagrama de alimentación doble a CC. Elaboración propia.

En esta ocasión, para obtener las expresiones oportunas se empleará el teorema de la superposición, considerando tres circuitos diferentes: *A* con la SE a  $U_1$ , *B* con la SE a  $U_2$ , y *C* sólo con el tren como fuente ideal de intensidad de valor  $I$ . Llevando a cabo los cálculos, de nuevo de baja dificultad, se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_{1A} = -I_{2A} = \frac{U_1}{r \cdot L} \quad ; \quad I_{1B} = -I_{2B} = \frac{U_2}{r \cdot L} \quad ; \quad I_{1C} = I \cdot \frac{L-x}{L} \quad I_{2C} = I \cdot \frac{x}{L}$$

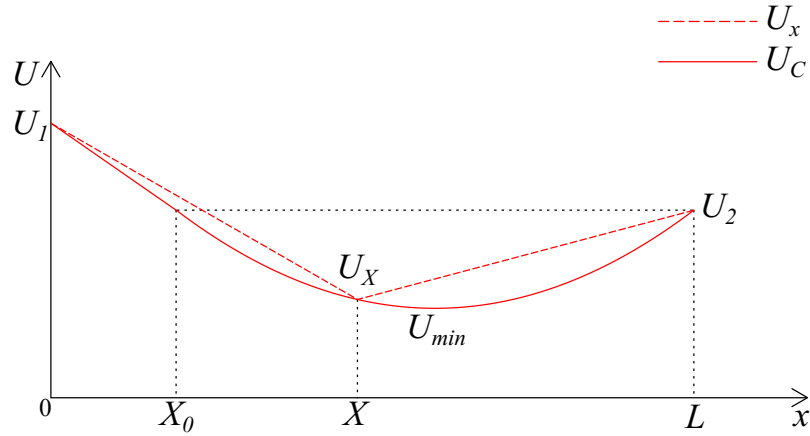
$$I_1 = I_{1A} + I_{1B} + I_{1C} \longrightarrow I_1 = \frac{U_1 - U_2}{r \cdot L} + I \cdot \frac{L-x}{L}$$

$$I_2 = I_{2A} + I_{2B} + I_{2C} \longrightarrow I_2 = -\frac{U_1 - U_2}{r \cdot L} + I \cdot \frac{x}{L}$$

$$\begin{aligned} U_C &= U_1 - \Delta U = U_1 - I_1 \cdot r \cdot x \longrightarrow U_C = U_1 - x \cdot \frac{U_1 - U_2}{L} - I \cdot r \cdot x \cdot \frac{L-x}{L} \longrightarrow U_C = \\ &= U_1 - \frac{U_1 - U_2}{L} \cdot x - (L \cdot x - x^2) \cdot \frac{I \cdot r}{L} \longrightarrow \|A = U_1, \quad B = \frac{U_1 - U_2}{L} + I \cdot r, \quad C = \frac{I \cdot r}{L} \| \longrightarrow \\ &\longrightarrow U_C = A - B \cdot x + C \cdot x^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{min} &= U - \Delta U_{max} = \min\{U_C\} = \min\{A - B \cdot x + C \cdot x^2\} \longrightarrow \left\| \frac{dU_C}{dx} = 0 \longrightarrow 0 = \right. \\ &= -B + 2 \cdot C \cdot x_{min} \longrightarrow x_{min} = \frac{B}{2 \cdot C} = \frac{\frac{U_1 - U_2}{L} + I \cdot r}{2 \cdot \frac{I \cdot r}{L}} = \frac{U_1 - U_2}{2 \cdot I \cdot r} + \frac{L}{2} \longrightarrow U_{min} = U_C(x_{min}) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= A - B \cdot x_{min} + C \cdot x_{min}^2 = A - B \cdot \left( \frac{U_1 - U_2}{2 \cdot I \cdot r} + \frac{L}{2} \right) + C \cdot \left( \frac{U_1 - U_2}{2 \cdot I \cdot r} + \frac{L}{2} \right)^2 \rightarrow \dots \rightarrow U_{min} = \\
&= U_1 - \frac{r \cdot L \cdot I}{4} \cdot \left( 1 + \frac{U_1 - U_2}{r \cdot L \cdot I} \right)^2 ; \quad \Delta U_{max} = \frac{r \cdot L \cdot I}{4} \cdot \left( 1 + \frac{U_1 - U_2}{r \cdot L \cdot I} \right)^2 \\
\\
\Delta u &= \frac{1}{L} \int_0^L I_1 \cdot r \cdot x \cdot dx \rightarrow \frac{1}{L} \int_0^L \left( \frac{U_1 - U_2}{r \cdot L} + I \cdot \frac{L - x}{L} \right) \cdot r \cdot x \cdot dx \rightarrow \Delta u = \frac{U_1 - U_2}{2} + \\
&+ \frac{I \cdot r \cdot L}{6}
\end{aligned}$$



**Figura 3.9** Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación doble a CC. Elaboración propia.

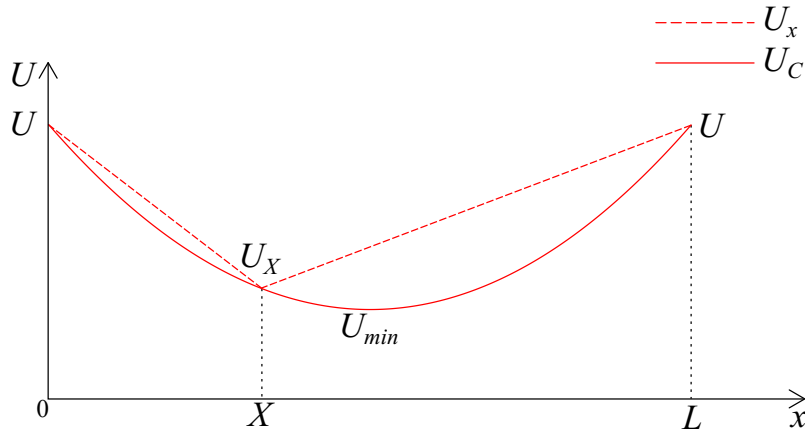
Aparece en la gráfica adjunta la posición  $X_0$ , la cual equivale al punto de la catenaria donde el tránsito de un vehículo produce una caída tal que su tensión coincide con la de  $U_2$ . La importancia de este punto es magna, pues mientras que a la derecha se pueden aplicar sin problemas las expresiones obtenidas, a su izquierda en su lugar se debe considerar la SE de menor tensión como un circuito abierto, pues lo contrario implicaría una transmisión de potencia entre ambas instalaciones, lo cual carece de sentido desde el punto de vista técnico.

Para realizar una comparación más sencilla y significativa entre esta configuración y la anterior (recuerde, alimentación única desde el extremo) se considerará el caso particular de  $U_2 = U_1$ , que bien por otra parte es el más común. Particularizando las anteriores expresiones obtenemos:

$$U_C = U - \Delta U = U - I_1 \cdot r \cdot x \rightarrow U_C = U - I \cdot r \cdot x \cdot \frac{L - x}{L}$$

$$U_{min} = U - \Delta U_{max} \longrightarrow U_{min} = U - \frac{r \cdot L \cdot I}{4} \quad ; \quad \Delta U_{max} = \frac{r \cdot L \cdot I}{4}$$

$$\Delta u = \frac{1}{L} \int_0^L I_1 \cdot r \cdot x \cdot dx \longrightarrow \frac{1}{L} \int_0^L \left( I \cdot \frac{L-x}{L} \right) \cdot r \cdot x \cdot dx \longrightarrow \Delta u = \frac{r \cdot L \cdot I}{6}$$



**Figura 3.10** Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación doble a CC a la misma tensión. Elaboración propia.

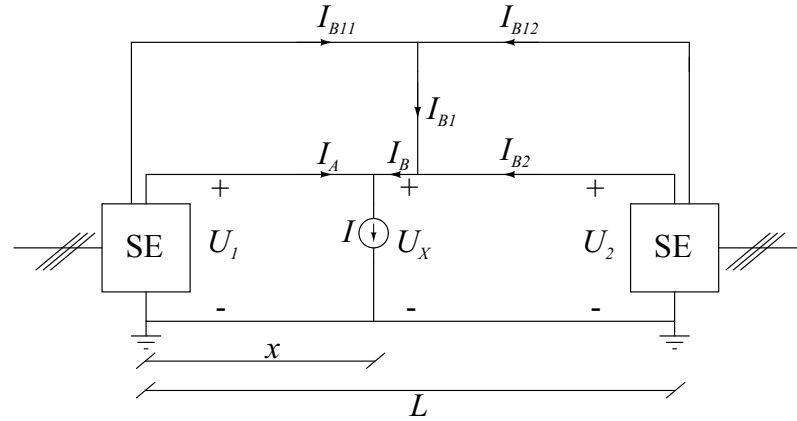
La primera gran diferencia que se aprecia es la forma que presenta  $U_C$ , si bien en el caso anterior ésta tenía un aspecto lineal, en esta ocasión muestra una forma parabólica. Esto es debido a que al tener dos fuentes en lugar de una, el punto de tensión mínima ya no estará en un extremo, sino en un lugar intermedio, el cual será  $\frac{L}{2}$  para el caso particular que nos ocupa.

En cuanto a la máxima caída de tensión, se ha conseguido reducir su magnitud a un cuarto del mismo, pasando de valer  $r \cdot L \cdot I$  a  $\frac{r \cdot L \cdot I}{4}$ . Igualmente se ha amortiguado la caída media de tensión, que se ha reducido desde  $\frac{r \cdot L \cdot I}{2}$  hasta  $\frac{r \cdot L \cdot I}{6}$ , lo cual obviamente supone un tercio de su valor anterior.

A la vista está que las ventajas ofrecidas por este sistema son múltiples y significativas, por lo que no es de extrañar que sea con diferencia el método más amplificado para llevar a cabo la alimentación a CC. Desgraciadamente, la rotación de fases descrita en capítulos anteriores impide en la mayoría de ocasiones que se pueda emplear este enfoque en los sistemas de CA. La única configuración que ofrece un efecto parecido es precisamente la  $2 \times 25$ , que de manera similar recrea este aspecto de la caída de tensión cuando el tren transita entre dos AT. En cualquier caso, la analogía entre ambas configuraciones no se puede hacer de manera más que cualitativa, ya si bien las SE inyectan potencia en la catenaria, los AT no. Sea como fuere, todo esto será visto en mayor detalle gracias a los resultados ofrecidos por la propia herramienta *RST*.

Como último ejercicio se propone el estudio de la configuración de **doble alimentación de dos vías conectadas entre sí** periódicamente. Por simplicidad se considerará una única conexión en a mitad de la vía, ya que el concepto y comportamiento mostrado son los

mismos, mientras que los cálculos necesarios son más simples. Igualmente se asumirá que ambas SE producen una tensión igual en sus conexiones a la catenaria.



**Figura 3.11** Diagrama de alimentación doble de dos vías a CC con conexión intermedia. Elaboración propia.

Para resolver este circuito se llevará a cabo un proceso similar al del apartado anterior: se empleará el teorema de la superposición desdoblando el actual circuito en dos diferentes (cada uno continente de un único tipo de fuente), para posteriormente asociar en paralelo y serie las ramas superiores, haciendo así inmediata la obtención de  $I_A$  a través de un divisor de corrientes. Realizando el proceso descrito se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_A = \frac{r \cdot (2L - 3x)}{2L} \cdot I$$

$$U_C = U - \Delta U = U - I_A \cdot r \cdot x \longrightarrow U_C = U - \frac{I \cdot r(2L - 3x)}{2L} \cdot x$$

$$U_{min} = U - \Delta U_{max} \longrightarrow U_{min} = \min\{U_C\} = \min\left\{U - \frac{I \cdot r(2L - 3x)}{2L} \cdot x\right\} \longrightarrow$$

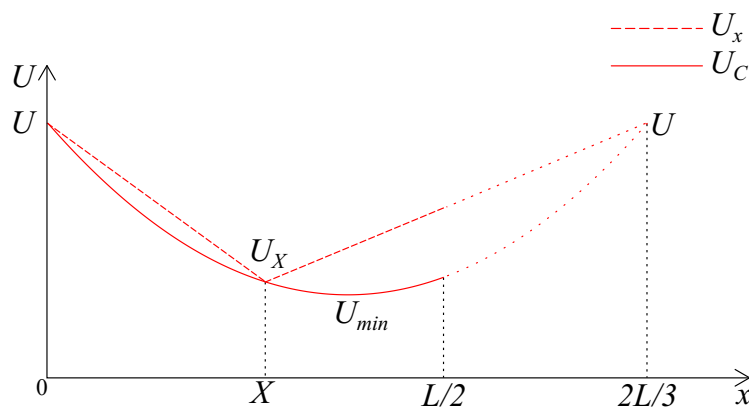
$$\longrightarrow \left\| \frac{dU_C}{dx} = 0 \longrightarrow 0 = r \cdot I - \frac{3 \cdot r \cdot I}{L} \cdot x \longrightarrow x = \frac{L}{3} \right\| \longrightarrow U_{min} = U - \frac{r \cdot L \cdot I}{6} \quad ;$$

$$\Delta U_{max} = \frac{r \cdot L \cdot I}{6}$$

$$\Delta u = \frac{1}{L} \int_0^{\frac{L}{2}} I_A \cdot r \cdot x \cdot dx \longrightarrow \frac{1}{L} \int_0^{\frac{L}{2}} \frac{r \cdot I}{2L} \cdot (2L - 3x) \cdot x \cdot dx \longrightarrow \Delta u = \frac{r \cdot L \cdot I}{8}$$

Tal y como se puede observar tanto en la gráfica adjunta como en los resultados analíticos, lo que se consigue con esta configuración es mejorar aún más el comportamiento presenta-

do por el caso anterior. Cualitativamente lo que sucede es que se repite la forma parabólica, pero esta vez en lugar de tener su vértice en  $\frac{L}{2}$ , lo tendrá en  $\frac{L}{3}$ . Esto implica que tanto la caída de tensión máxima como la caída de tensión promedio disminuirán sensiblemente su valor, tal y como los cálculos arriba desarrollados muestran.



**Figura 3.12** Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación doble a CC con conexión entre vías. Se muestran los perfiles a lo largo de la catenaria hasta la unión en  $\frac{L}{2}$ . Elaboración propia.

Esta combinación no es tan frecuente como la anterior, pues implica una gran inversión adicional para las mejoras que introduce. Sí que se emplea en trayectos urbanos de doble vía y bajo tránsito, pues cuando circulan de manera simultánea dos vehículos por vías opuestas los cálculos llevados a cabo varían, empeorando las prestaciones de este sistema y restándole así interés.

Al igual que sucedía en el caso anterior, el estudio de esta configuración será útil a la hora de comprender los perfiles de tensión en los sistemas de CA. Concretamente, esta disposición de doble vía presenta ciertas analogías con la configuración de doble vía del sistema  $1 \times 25$ . La razón es obvia, pues a pesar de que en CA no tendremos una segunda SE inyectando potencia los PPS permitirán que la corriente circule también por la vía contraria, produciendo así un fenómeno similar. Igualmente procede repetir un discurso similar al expuesto en la analogía del caso anterior: la comparación entre ambas configuraciones no abandona el campo cualitativo, pues si bien las SE inyectan potencia en la red, los PPS simplemente ofrecen un camino alternativo a la corriente, reduciendo así la impedancia equivalente del sistema.

## 3.2 Alimentación a 16'7 Hz

Este particular sistema comenzó a ser explotado en la actual Alemania, y desde ahí se fue desarrollando por el resto de naciones sajonas y germanas, abarcando hoy día desde Suiza hasta los países nórdicos. Su empleo hoy día se justifica por la amplia red adaptada ya existente, pues si bien **los sistemas  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$  presentan unas mejores prestaciones** en todos los ámbitos, éstas no compensan tamaña inversión necesaria para adaptar todas las vías ya existentes.

La razón del particular nivel de frecuencia empleado por este sistema, 16'7 Hz, encuentra su origen igualmente en razones históricas. Los motores de inducción monofásicos

existentes durante los inicios del siglo XX no podían trabajar a los actuales órdenes de frecuencia debido a la aparición de chispas en la zona de contacto entre escobillas y conmutador, lo cual provocaba con asiduidad severos daños, incluso incendios en el peor de los casos. Así pues la solución que se implementó fue reducir en un tercio el valor de la frecuencia industrial, pasando de alimentar los motores a 50 Hz a hacerlo a unos precisos  $16\frac{2}{3}$  Hz. Con el tiempo ese valor cambió ligeramente hasta los 16'7 Hz para evitar que la frecuencia empleada coincidiera con la velocidad de sincronismo de los rotores de los convertidores asíncronos.

El hecho de explotar la red a 15 kV como tensión de servicio se explica únicamente como un intento de compensar el empleo de una frecuencia tres veces menor que la industrial, tratando así de elevar la transmisión de potencia que el sistema pueda soportar.

Como ya se mencionó en apartados anteriores, el sistema a 16'7 Hz está en decadencia, y no para de perder territorio en favor de las configuraciones a 50 Hz ¿A qué se debe? Únicamente debido al hecho de que alimenta al tren a una frecuencia tres veces menor que sus competidores, lo cual tiene consecuencias tanto a nivel de catenaria como de locomotora.

En lo que concierne a la catenaria, al emplear una frecuencia tres veces menor también disminuye la potencia que es capaz de transportar la onda, fenómeno que se ve acentuado al emplear 15 kV en lugar de 25 kV. Sin lugar a dudas esta es una desventaja que ya de por si aclara cualquier duda a la hora de elegir entre un sistema y otro a la hora de proyectar una nueva línea.

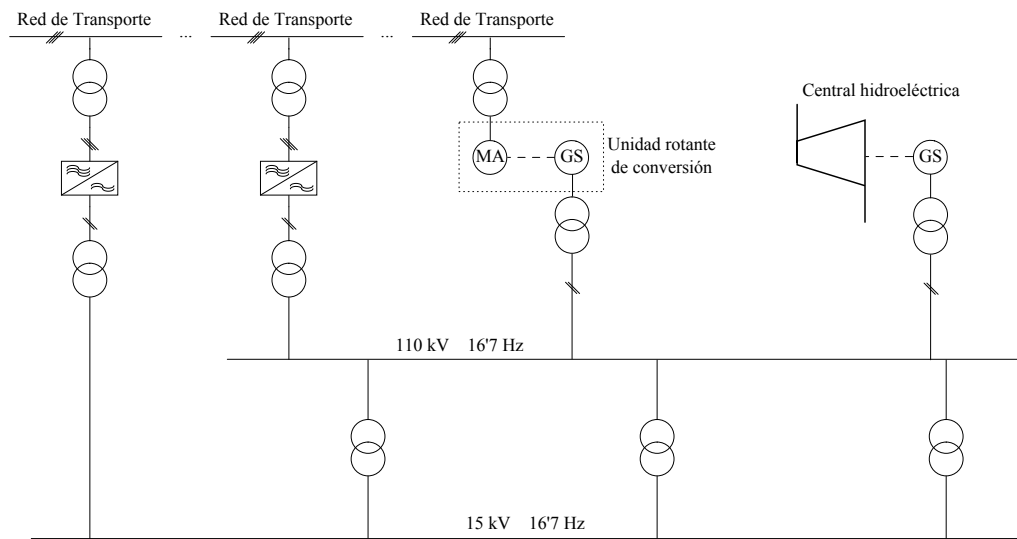
Tal y como se expone a continuación, los efectos a bordo del tren tampoco son precisamente despreciables. Hoy día a la hora de proyectar una línea, lo que prima es la rentabilidad de la misma, más aún cuando la mayoría de estos proyectos se adjudican tomando como criterio indicadores económicos propios del proyecto. Simplificando mucho el discurso, se puede decir que el retorno de la inversión de una obra ferroviaria se acelerará tanto en cuanto mayor sea el número de pasajeros que pueden ir en cada viaje, cantidad que en última instancia viene limitada por el peso máximo que puede mover la locomotora. La relación de este discurso con la alimentación a 16'7 Hz reside en la bien conocida "regla del pulgar" del tamaño de las máquinas eléctricas: para transmitir la misma potencia a un tercio de la frecuencia un transformador necesita un tamaño tres veces superior. Este discurso es extensible al motor y los diferentes componentes a bordo, que no son pocos, lo cual aumenta todavía más la envergadura del problema, ya que todo peso adicional dedicado a maquinaria (que ciertamente no es poco) no se podrá dedicar a transportar pasajeros, lo que terminará repercutiendo sensiblemente en el rendimiento económico de la vía.

A diferencia del apartado anterior, en esta ocasión no se llevará a cabo ningún tipo de análisis numérico, ya que si bien los resultados cualitativamente coinciden con los de CC, se prefiere no invertir más tiempo en un apartado no tan relevante como éste para el objeto del trabajo.

### **3.2.1 Alimentación Central y Distribuida**

Este sistema dispone de dos enfoques diferentes a la hora de alimentar la catenaria, los conocidos como Central y Distribuido. Mientras que el primero emplea una línea a 110 kV dedicada especialmente a alimentar las vías, el segundo en su lugar establece conexiones

puntuales con la red de transporte. Se procede a profundizar un poco más en cada tipo de alimentación:



**Figura 3.13** Diagrama del sistema a 16'7 Hz con alimentación centralizada. Elaboración propia.

La red de AT monofásica empleada por la **alimentación centralizada** puede ser energizada de dos maneras diferentes: mediante centrales hidroeléctricas y termoeeléctricas dedicadas y conexiones periódicas a la red industrial. El hecho de que existan diversas fuentes de potencia de tan diversa índole implican que la regulación de frecuencia será más laxa, tomándose concretamente como margen una variación máxima del 4 %. En cualquier caso esto no implica que cuando sea necesario no se pueda directamente alimentar la vía desde la propia red de transporte, tal y como muestra el diagrama adjunto.

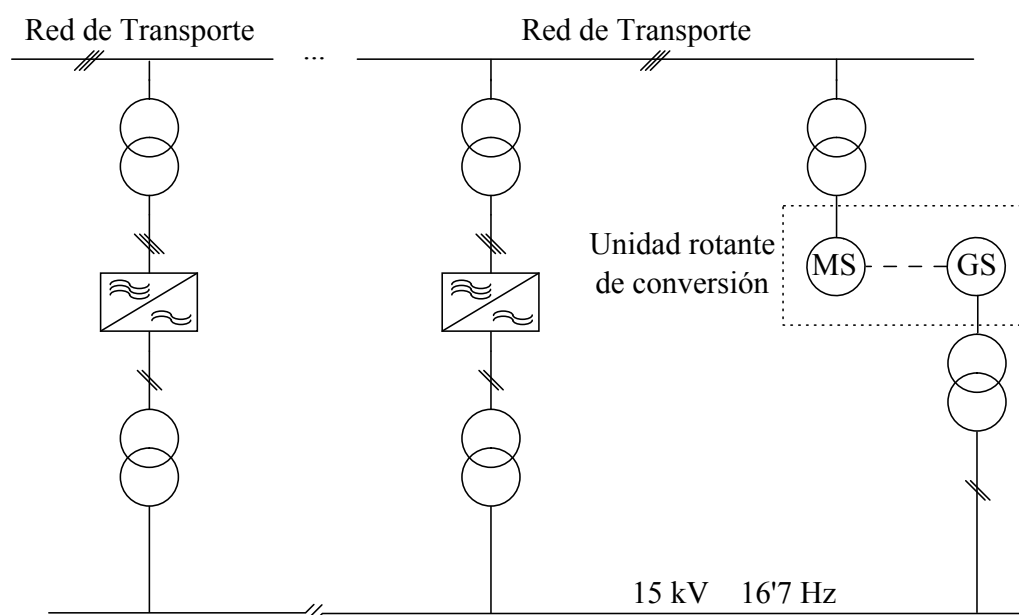
Cabe destacar el ingenioso planteamiento de la **unidad rotante de conversión**, pues ésta debe estar diseñada para permitir tanto la transformación de tensión como de frecuencia. En esta unidad, a fin de prescindir de cualquier alimentación auxiliar para el arranque, el rotor del generador síncrono viene alimentado por la propia red de transporte, obviamente mediante un elemento rectificador de onda previo. Para que la corriente producto de esta unidad tenga una frecuencia flexible, lo que se hace es conectar eléctricamente el rotor del generador síncrono con el rotor del motor asíncrono a través de un convertidor de estado sólido. De esta manera se puede alterar (así que controlar) la corriente inducida en el rotor del motor, lo que en última instancia hace variar la velocidad de sincronismo del mismo, y con ella la frecuencia producida por el generador síncrono.

Las ventajas que ofrece este sistema son varias: permite llevar a cabo la alimentación doble, que tal y como fue visto en el apartado anterior ofrece sustanciales mejoras, abre la posibilidad a regular los niveles de tensión y frecuencia a lo largo de la catenaria de diferentes maneras gracias a los múltiples puntos de inyección de potencia, lo cual además le otorga una buena capacidad para absorber grandes cambios en el consumo.

La desventaja de esta configuración es que para un sistema ya en decadencia, como es el de 16'7 Hz, requiere de toda una gran inversión e infraestructura propia. Precisamente por ello, si hoy día se planteara la posibilidad de proyectar una nueva línea ferroviaria a

16'7 Hz seguramente no se empleara esta configuración, ya que para el tráfico a abastecer la inversión es demasiado grande. Tal y como se verá a continuación, esto no ocurre con el otro enfoque.

Por otra parte, en la **alimentación distribuida** lo que se hace es aprovechar las redes de transporte cercanas para energizar los diferentes tramos de la catenaria, empleando una frecuencia fija en lugar de la flexible de la situación anterior, y sin utilizar una red propia de por medio. Efectivamente, en esta configuración hay que hablar de tramos, no como en la alimentación centralizada, pues al llevarse a cabo una transformación de frecuencia a ratio fijo no se puede permitir la confluencia de puntos de inyección de potencia provenientes de diferentes redes de transporte, debido a la posible diferencia en el valor de frecuencia entre las diferentes redes.



**Figura 3.14** Diagrama del sistema a 16'7 Hz con alimentación distribuida. Elaboración propia.

Tal y como se puede observar en esta ocasión los grupos de conversión rotativa emplean una máquina síncrona en lugar de asíncrona, como sucedía en el caso anterior, lo cual es debido al hecho previamente mencionado de que la frecuencia queda fija sin margen alguno. Igualmente perceptible es el hecho de que la doble alimentación sigue siendo posible en este enfoque, aunque siempre estará supeditada a que ambos puntos de inyección pertenezcan a la misma red de transporte. Así pues, mientras que la regulación de frecuencia resulta mucho más simple (de hecho es inexistente), no se puede ir ajustando el nivel de tensión de manera precisa a lo largo de la catenaria, como ocurría en la situación anterior. El aspecto más interesante de este enfoque para los proyectistas de hoy día, es que precisamente requiere de una inversión significativamente menor, al prescindir de la red dedicada que empleaba el sistema de alimentación centralizada.



### 3.3 Alimentación a Frecuencia Industrial

Se cierra este capítulo tratando los sistemas que ocupan este trabajo y proyecto, es decir, los ya conocidos  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$ . A lo largo de esta sección describiremos sus características, al igual que ya se ha hecho con los sistemas precedentes, remarcando las similitudes y diferencias entre ambas configuraciones.

De todos los sistemas de alimentación ferroviaria ya vistos, este fue el último en desarrollarse. La necesidad de una mayor transmisión de potencia y la adecuación de las máquinas eléctricas permitieron que en la década de los 50 del siglo XX la compañía ferroviaria francesa pudiera comenzar las primeras pruebas, empleando por vez primera en mucho tiempo un sistema de CA basado en la frecuencia industrial.



**Figura 3.15** Antiguo modelo AVE funcionando en un sistema  $2 \times 25$ . Fuente: [8].

Sólo hace falta remitirse a la situación actual de la red de ferrocarril para comprobar que efectivamente este sistema se ha terminado imponiendo a sus competidores en el ámbito de la alta velocidad europea. Una mayor capacidad de transmisión de potencia, conexiones simples a la red de transporte y efectivamente la explotación a 50 Hz son las principales razones de su supremacía. Otra fortaleza de esta configuración es la facilidad que tiene para evolucionar y adaptarse a niveles cualitativamente superiores en cuanto a calidad, como son los que ofrece la combinación  $2 \times 25$ . Para que se haga una idea, si bien la primera línea de AVE, Madrid-Sevilla con motivo de la Exposición Universal de 1992, se proyectó explotando el sistema  $1 \times 25$ , todas las venideras se llevaron a cabo empleando el  $2 \times 25$  mayoritariamente o totalmente.

#### 3.3.1 Desequilibrio Introducido en la Red

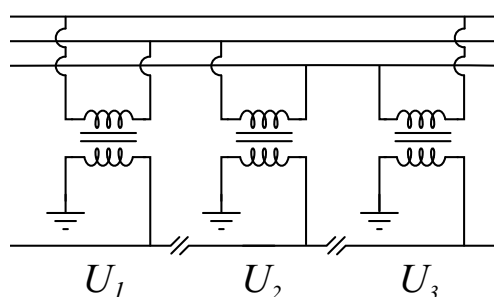
Antes de proceder a la revisión de los diferentes elementos contenidos en la SE, es menester realizar un breve estudio sobre **el impacto que produce en la red** el trayecto ferroviario en cuestión. Recuerde que la conexión a la red de transporte en CC se hace a través de transformadores trifásicos con puentes rectificadores, anulando desequilibrio alguno y produciendo una corriente de potencia instantánea constante; y que a 16'7 Hz o bien se empleaban unidades rotantes de entrada trifásica y salida monofásica, centrales dedicadas,

o transformadores trifásicos con convertidores de frecuencia, por lo que el impacto volvía a ser nulo. Esto no sucede en los sistemas que ocupa esta sección, ya que a fin de simplificar el planteamiento y prescindir de convertidores y el contenido armónico adicional que pueden vertir, se emplean únicamente transformadores de potencia para reducir la tensión hasta los 25 kV deseados.

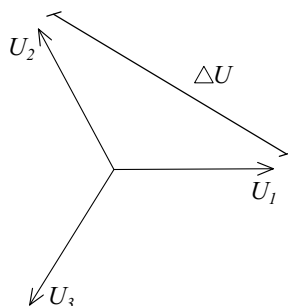
A rasgos generales lo que se hace es dividir el trayecto en múltiples sectores separados (en este sentido, cuantos más mejor) por zonas neutras, cada uno alimentado por una combinación de fases diferente a la de la SE previa y posterior. Para juzgar la bondad de una configuración en lo que a desequilibrio concierne se emplea el factor de sobretensión  $K_v$ , que se puede aproximar al cociente entre la potencia absorbida por la conexión monofásica y la potencia de cortocircuito de la red, siendo por ley  $K_v \approx \frac{P_{SE}}{P_{CC}} < 1\%$  en servicio continuo. Por esto mismo siempre se intentará tanto en cuanto sea posible llevar a cabo conexiones a las redes disponibles que sean más poderosas.

Quizás a día de hoy, pudiendo ejercerse de manera habitual estas conexiones poderosas, un problema de más difícil solución sea aquel de intentar que la diferencia de tensión entre dos SE consecutivas no sea demasiado elevada, ya que de lo contrario se podría producir un arco por la superficie del aislador dispuesto entre sección neutra y tramo, provocando un cortocircuito. A lo largo de los últimos años se han planteado tres enfoques posibles como respuesta al intento de minimizar la tensión entre SE, los cuales van a ser tratados a continuación:

La configuración más inmediata y simple es aquella conocida como la de **Tercer Orden**, y considera la repetición continua de la misma combinación de tres transformadores consecutivos conectados cada uno a una pareja de fases diferente, tal y como muestra la figura adjunta.



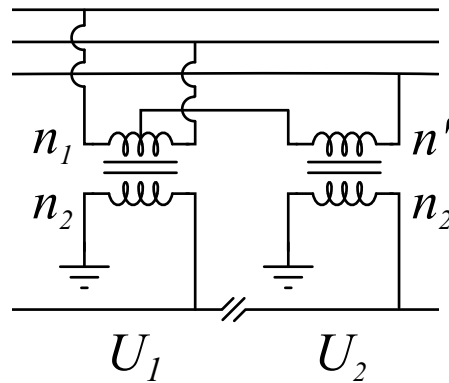
**Figura 3.16** Diagrama de la configuración de tercer orden. Elaboración propia.



**Figura 3.17** Diagrama vectorial de la configuración de tercer orden. Elaboración propia.

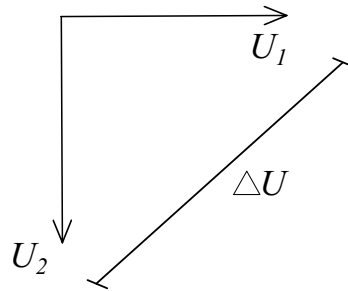
$$\Delta U = |U_1/0^\circ - U_2/120^\circ| = \sqrt{3} \cdot 25kV$$

Otra configuración cualitativamente más compleja, y que ofrece mejores resultados que la anteriormente tratada, es aquella la cual emplea un transformador de **Conexión Scott**, tal y como muestra la figura adjunta.



**Figura 3.18** Diagrama de la configuración de conexión Scott. Elaboración propia.

En esta ocasión los cálculos son más difíciles, pues hay que tener en cuenta la tensión producida por ambos arrollamientos de diferente relación. En cualquier caso, sabiendo el grupo vectorial de este transformador todo se simplifica significativamente:

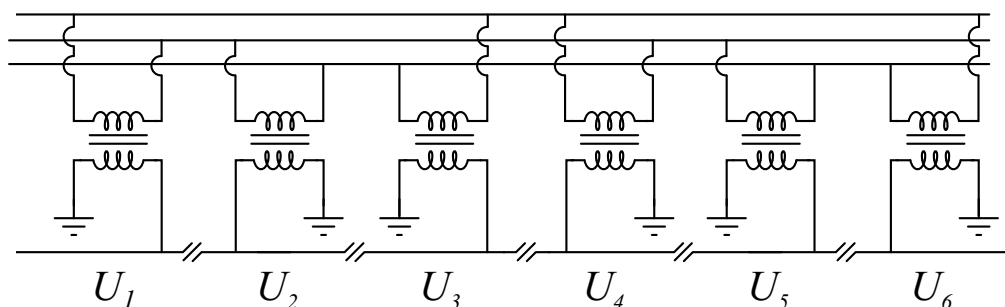


**Figura 3.19** Diagrama vectorial de la configuración de conexión Scott. Elaboración propia.

$$\Delta U = |U_1/0^\circ - U_2/-90^\circ| = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 25kV \quad ; \quad n' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot n$$

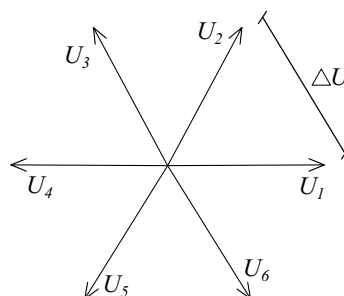
Ciertamente con esta conexión mejoramos sensiblemente la diferencia de tensión entre una sección y otra, pasando a valer justo la mitad que antes. El inconveniente de esta configuración es el precio de la misma, pues requiere de dos tipos diferentes de máquinas, una de las cuales es un tanto particular y cuenta con una toma central. Igualmente es un gran inconveniente que en caso de necesidad un tramo no podrá alimentar a otro.

La última configuración a tratar es aquella más utilizada, porque ciertamente empleando un enfoque simple y barato ofrece **los mejores resultados** de los aquí expuestos. Esta disposición es la conocida como aquella de **Sexto Orden**, y no es más que la evolución cualitativa de la de tercer orden. La diferencia reside en que en esta ocasión el lado del arrollamiento secundario que se conecta al raíl va cambiando, de tal manera que se consigue cambiar la fase de la tensión, tal y como muestra la figura adjunta. Así pues conseguimos que el diagrama vectorial del sistema entero, en lugar de tener forma de triángulo equilátero, la tenga de hexágono.



**Figura 3.20** Diagrama de la configuración de sexto orden. Elaboración propia.

Los cálculos vuelven a ser cualitativamente más sencillos, ya que la única diferencia a introducir en aquellos de la conexión de tercer orden es que ahora la fase no aumenta a razón de  $120^\circ$ , sino con pasos de  $60^\circ$ . Así pues se termina obteniendo que la diferencia de tensión entre dos secciones correlativas coincide con la propia tensión de la catenaria:



**Figura 3.21** Diagrama vectorial de la configuración de sexto orden. Elaboración propia.

$$\Delta U = |U_1/0^\circ - U_2/60^\circ| = 25kV$$

Resulta obvio que estos valores son los mejores obtenidos hasta ahora, y por ello mismo es esta la configuración habitualmente escogida en los proyectos de líneas ferroviarias a 25 kV.

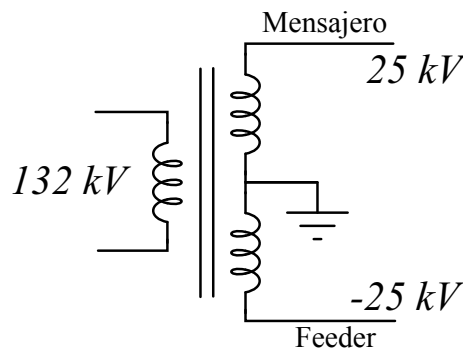
Dicho todo esto, se puede repetir el discurso expuesto cuando se trataron las diferentes conexiones posibles de la SE a la red de transporte. Una vez que la decisión ha sido tomada, un tren circulante no va a notar la diferencia entre un trayecto que emplee la disposición de tercer o sexto orden, ya que en última instancia **la diferencia entre una configuración y otra se plasma en la inversión necesaria** en aisladores y la probabilidad de falta en el

sistema.

### 3.3.2 Equipos de Alimentación

Al igual que en el resto de sistemas, en las configuraciones  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$  la misma instalación de una SE se emplea para acoger los transformadores de dos secciones diferentes, tanto para facilitar las labores de reconexión, disminuir los costes de obra civil, e intentar amortiguar el desequilibrio introducido en la red todo lo posible. Otra práctica común en esta etapa del sistema de alimentación es aquella de emplear un AT para conectar la línea primaria a la red de transporte. Esto se debe a la necesidad de una reducción de la tensión tan eficiente como sea posible, y a que no es un objetivo de esta conexión establecer aislamiento galvánico alguno. Esta máquina suele tener una relación de transformación de  $\frac{380}{132}$  kV, teniendo como potencia nominal un valor suficiente para alimentar simultáneamente varias secciones de catenaria a su máxima capacidad, algo que nunca sucede debido al sobredimensionamiento y a frecuencias de tránsito no tan elevadas.

La configuración  $1 \times 25$  hace usufructo de un transformador en la SE es de tipo convencional, con un arrollamiento primario y otro secundario, mientras que la  $2 \times 25$  dispondrá de un primario y dos secundarios (por la existencia del feeder). Las máquinas son diseñadas con una relación  $\frac{132 \pm 8\%}{2 \times 27.5}$  y  $\frac{132 \pm 8\%}{27.5}$  kV, tal que la tensión de salida sea regulable a través de cambiadores de tomas en carga en el primario. La potencia nominal de cada transformador de la SE dependerá absolutamente de la línea a proyectar y sus características, pero en el ámbito español Adif establece dos niveles de potencia admisibles: **30 y 60 MVA** (15 y 30 MVA por arrollamiento secundario respectivamente), ambos con  $\epsilon_{CC} = 10\%$  [9]. De esta manera se energiza aproximadamente la catenaria con hasta **1'5 MW/km**.

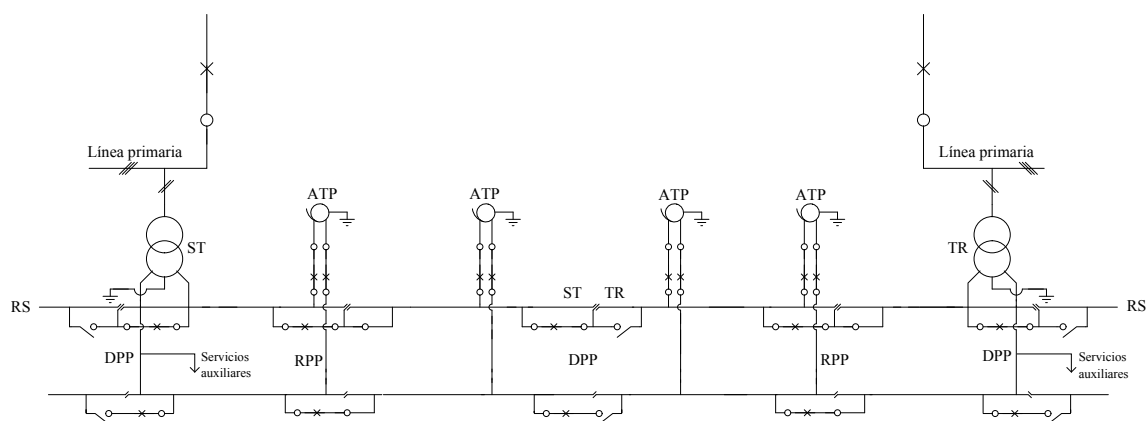


**Figura 3.22** Diagrama de conexiones de un transformador de la SE del sistema  $2 \times 25$ . Elaboración propia.

En la configuración  $2 \times 25$  el transformador de la SE hace las veces de primer AT de la serie: de los dos arrollamientos secundarios, mientras que uno conecta su "parte positiva" al hilo mensajero, el segundo arrollamiento une su cabo negativo con el feeder, para más tarde unir el negativo del primero con el positivo del segundo y conectar ambos al cable de retorno (o raíl en su defecto). De esta manera se consigue alimentar el mensajero a 25 kV y el feeder a -25 kV, satisfaciendo las necesidades en cuanto a niveles de tensión de este sistema.

### 3.3.3 Sistema de Catenaria

El sistema de catenaria de estas configuraciones quizás sea el más complejo y completo de todos los aquí expuestos, pues a diferencia de los otros casos en esta ocasión no se puede llevar a cabo bajo circunstancia alguna la alimentación doble, debido a los motivos previamente expuestos.



**Figura 3.23** Diagrama típico del sistema de catenaria de la configuración  $2 \times 25$ . Elaboración propia.

La conexión a la catenaria se realiza justo en la frontera entre una sección y otra, es decir, se realiza en un DPP. La inmediata salida de los cables del transformador igualmente se explota como punto de alimentación de los sistemas auxiliares, que recuerde tienen un impacto más que mínimo. La catenaria emana entonces del DPP y avanza a lo largo de la vía, completando las llamadas **celdas**, que no son más que la considerada como unidad mínima estructural del sistema de catenaria, y que está delimitada por dos **IB** consecutivos habitualmente dispuestos **cada 0'4 - 1'5 km**. La catenaria se ve eléctricamente interrumpida aproximadamente **cada 10 o 15 kilómetros** para establecer los ya vistos **RPP** [10].

En cada tramo la catenaria habitualmente "muere", eléctricamente hablando, pasados unos 40 km de recorrido para la configuración  $2 \times 25$  (considerablemente menos en la  $1 \times 25$  debido a la peor transmisión de potencia), aunque como sucede con todas las magnitudes dadas en esta sección, el valor indicado es variable y dependiente de cada proyecto. En esa posición se instala un aislador y da comienzo una sección neutra de unos cien metros, tras la cual se dispone otro aislador y así da comienzo el próximo tramo.

**Tabla 3.1** Puestos empleados en las configuraciones  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$ . Elaboración Propia..

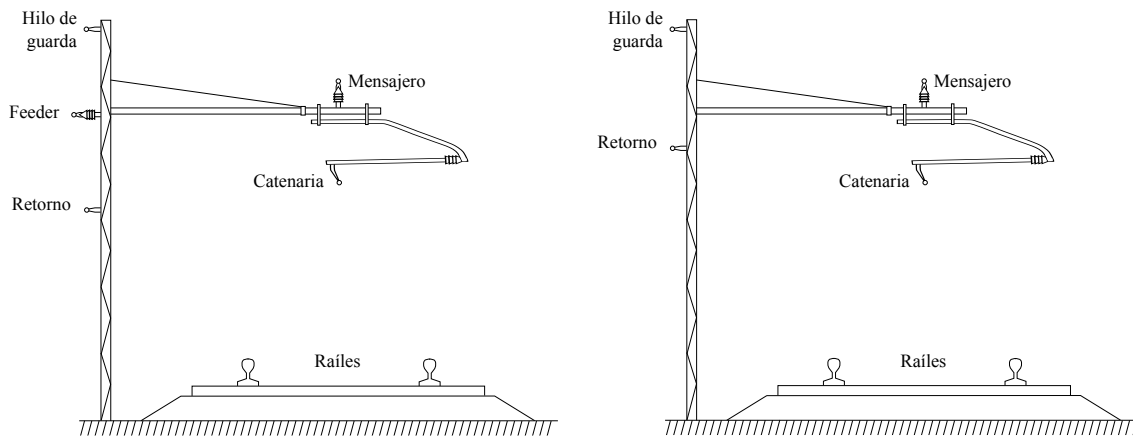
Nombre del Puesto	DPP	RPP y PPS	PATP / DPATP	IB
Distancia típica (km)	40	10 - 15	10 - 15	0'4 - 1'5

Todo el sistema de tramos aquí descrito se repite una y otra vez, cambiando las fases conectadas a la SE, hasta que se logra cubrir la distancia del trayecto, que como sabrá el lector varía de manera amplísima. Recuerde que no toda la vía puede ser compuesta a íntegramente a base de los tramos aquí descritos, ya que en las inmediaciones de las estaciones hay que emplear la CC mediante el ya visto POC.



**Figura 3.24** Cartel avisando del cese de la alimentación antes de la entrada en una sección neutra. Captura propia.

En cuanto a los **hilos que componen el sistema** y su disposición, en esta configuración se suele trabajar con un número mínimo de cables (entiéndase por cable medio metálico que transporta corriente relevante para el cómputo del flujo de potencia) de cuatro para el  $1 \times 25$ : **mensajero**, **catenaria** y **los dos raíles**, a los que habría que sumarle el cable de comunicación. Esta cantidad puede ser ampliada hasta los seis si incluimos un hilo de guarda (recuerde, para proteger al sistema ante descargas eléctricas meteorológicas) y otro de **retorno de corriente**, práctica que en cualquier caso es la habitual. Lo mismo es aplicable a la configuración  $2 \times 25$ , con la salvedad de que indudablemente hay que añadir un último cable, el feeder.



**Figura 3.25** Diagrama de las versiones completas de catenaria del  $2 \times 25$  y  $1 \times 25$ . Se muestran sólo los cables relevantes para el flujo de potencia. Elaboración propia.

En cualquier caso no es tan común dedicar un cable en exclusiva a la protección ante rayos. Otra alternativa más económica es ubicar el hilo de retorno de corriente en lo alto del poste, para que así también haga las veces de cable de guarda.

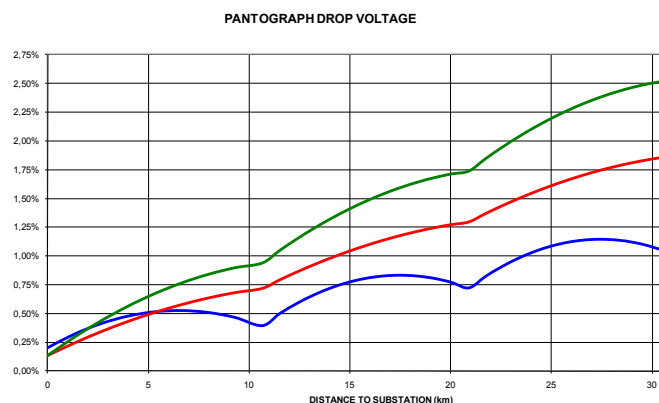
### 3.3.4 Autotransformadores

Con lo expuesto hasta ahora termina la revisión técnica del sistema  $1 \times 25$ , en la que se han tratado los equipos empleados, su configuración, órdenes de magnitud en cuanto a la potencia nominal, niveles de tensión, distribución de los hilos y la estructura general del sistema. Por otra parte esto no es suficiente en lo que respecta la configuración  $2 \times 25$ , pues todavía queda por tratar lo que precisamente diferencia un enfoque del otro: el sistema de autotransformadores.



**Figura 3.26** Foto de los AT empleados en un DPATP. Fuente [6].

¿Por qué instalar los AT? La razón principal es que permiten transmitir el **doble de potencia** a la SE, ya que si bien se sigue alimentando a 25 kV, disponemos de un segundo cable que aportará potencia adicional a la celda en la que se ubica el tren (más adelante se verá en mayor profundidad). Motivos adicionales son la menor caída de tensión ante una misma carga, mayor longitud de los tramos (eso es, menos SE), sensiblemente menores EMI...

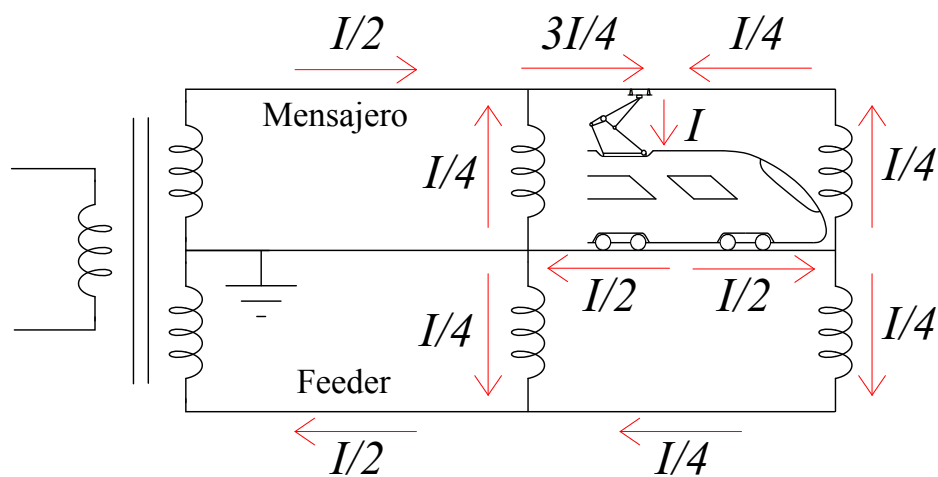


**Figura 3.27** Comparación de la caída de tensión desde la SE al pantógrafo en tres configuraciones diferentes: línea verde  $1 \times 25$ , línea roja  $1 \times 25$  de doble sección de hilo, y línea azul  $2 \times 25$ . Fuente [10].



Como ya fue tratado con anterioridad los AT se conectan a la catenaria mediante los PATP y DPATP, habitualmente dispuestos **cada 10 o 15 km**, como los RPP (nos referiremos a este espacio comprendido entre dos AT como subtramo). Teniendo en cuenta que un tramo suele medir 40 km, podemos estimar en cuatro el número típico de AT empleados por sección, siendo el primero los propios arrollamientos secundarios del transformador de la SE. Dichas máquinas poseen una tensión de cortocircuito sensiblemente menor que el transformador reductor de la SE,  $\varepsilon_{CC} = 1\%$ , con una relación de transformación de  $\frac{55}{27.5}$  kV y dos valores posibles de potencia nominal, **10 y 15 MVA**, según Adif [11].

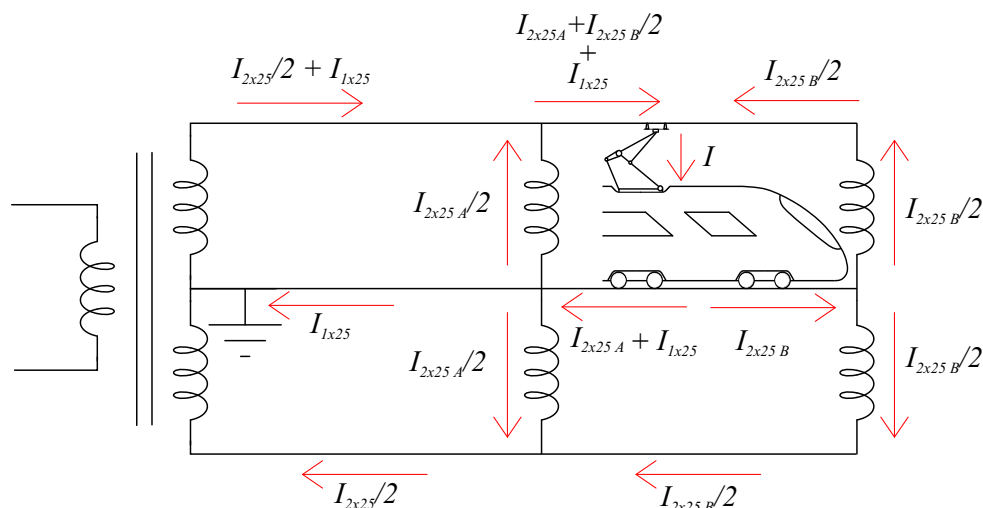
Cada AT ve su terminal positivo conectado a la catenaria, el negativo al feeder, y el medio al cable de retorno o raíl. Así pues, cuando el tren circula por la vía e inyecta una gran cantidad de corriente en los raíles, los AT redirigen la mitad (en condiciones ideales) de la corriente a la catenaria y la otra mitad al feeder, tal y como indica el diagrama adjunto. De esta manera la corriente circulante por la catenaria disminuye drásticamente, y con ella la caída de tensión.



**Figura 3.28** Distribución ideal de corrientes en la configuración  $2 \times 25$ . Elaboración propia.

Obviamente la distribución previamente descrita no deja de ser ideal y teórica, pues desprecia cualquier efecto de la tensión de cortocircuito de los AT, el efecto de realimentación de la inducción mutua entre los dos hilos,... Todo esto se traduce en dos fenómenos en cuanto a la distribución de corrientes: que sí que circulará corriente por los raíles de los subtramos vacíos entre el tren y la SE, y que la corriente circulante por los carriles del subtramo ocupado que va al AT más cercano a la SE no será igual a la que va dirigida hacia el otro AT.

Miembros del Politecnico di Milano (con los cuales el autor ha tenido el placer de colaborar), han conseguido diseñar un método analítico para **obtener la distribución real** de las corrientes sabiendo las propiedades de los AT empujados. Para modelar el primer efecto consideramos una distribución tipo  $1 \times 25$ ,  $I_{1 \times 25}$ , que obviamente no circulará por el feeder. La segunda distribución será propiamente  $2 \times 25$ ,  $I_{2 \times 25}$ , pero en esta ocasión las corrientes en las que se subdivide en izquierda y derecha,  $I_{2 \times 25A}$  e  $I_{2 \times 25B}$  respectivamente, **dependerán de las propiedades de los AT** empleados.

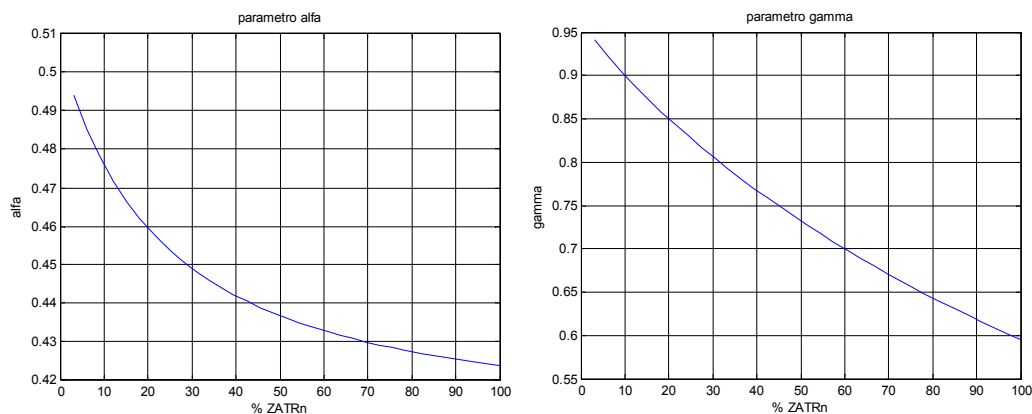


**Figura 3.29** Distribución real de corrientes en la configuración 2×25. Elaboración propia.

$$I = I_{1 \times 25} + I_{2 \times 25} \quad ; \quad I_{1 \times 25} = (1 - \gamma) \cdot I \quad ; \quad I_{2 \times 25} = \gamma \cdot I$$

$$I_{2 \times 25} = I_{2 \times 25A} + I_{2 \times 25B}$$

$$I_{2 \times 25A} = \alpha \cdot I_{2 \times 25} = \alpha \cdot \gamma \cdot I \quad ; \quad I_{2 \times 25B} = (1 - \alpha) \cdot I_{2 \times 25} = (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot I$$



**Figura 3.30** Relación  $\epsilon_{CC} - \alpha$  y  $\epsilon_{CC} - \gamma$ . Fuente: [12].

A la vista está que la distribución real según el mencionado estudio **diste sensiblemente de la ideal**, y que ambas sólo coincidirán en el caso de que  $\gamma = 1$  (no circula corriente por los raíles de los subtramos vacíos) y  $\alpha = 0.5$  (la corriente se distribuye de igual manera hacia la izquierda y la derecha). Echando un vistazo a las gráficas adjuntas vemos que en lo que respecta a la influencia de  $\epsilon_{CC}$  de los AT sobre los parámetros, para que se de la distribución ideal se debe de tener una impedancia nula, lo cual ciertamente indica condi-

ciones ideales. Igualmente es reseñable que **cuanto mayor es la tensión de cortocircuito mayor resulta la diferencia entre la distribución real y aquella ideal**, pues según  $\varepsilon_{CC}$  crece, tanto  $\gamma$  como  $\alpha$  decrecen, ganando peso así la componente de la distribución  $1 \times 25$ . Que decir tiene, que a pesar de que sólo se ha mostrado la dependencia de  $\gamma$  y  $\alpha$  con  $\varepsilon_{CC}$ , ambos parámetros dependen de un gran abanico de variables como la posición del tren, impedancia puesta a tierra y de la catenaria,... por lo que el empleo de dichas variables para obtener la distribución real no será tan sencillo.

Esta particular distribución será al final del documento empleada como **criterio verificador**. Que la distribución de corrientes indicada por *ARI* coincida con los resultados que ofrezca el código, dadas las características de los AT y demás variables en juego, es un buen punto a favor en términos de veracidad de cercanía a la realidad, aunque será realmente improbable que se de la coincidencia absoluta debido a las numerosas variables que afectan a la distribución.



## 4 Fundamentos Teóricos del Railway Simulation Tool

---

En este cuarto capítulo se procede por vez primera a tratar el objeto de este documento como tal, la herramienta *RST*. Antes de considerar la implementación y desarrollo técnico de la misma, se considera oportuno profundizar en sus fundamentos, es decir, en el enfoque teórico adoptado para resolver el problema planteado.

### 4.1 Planteamiento del Problema

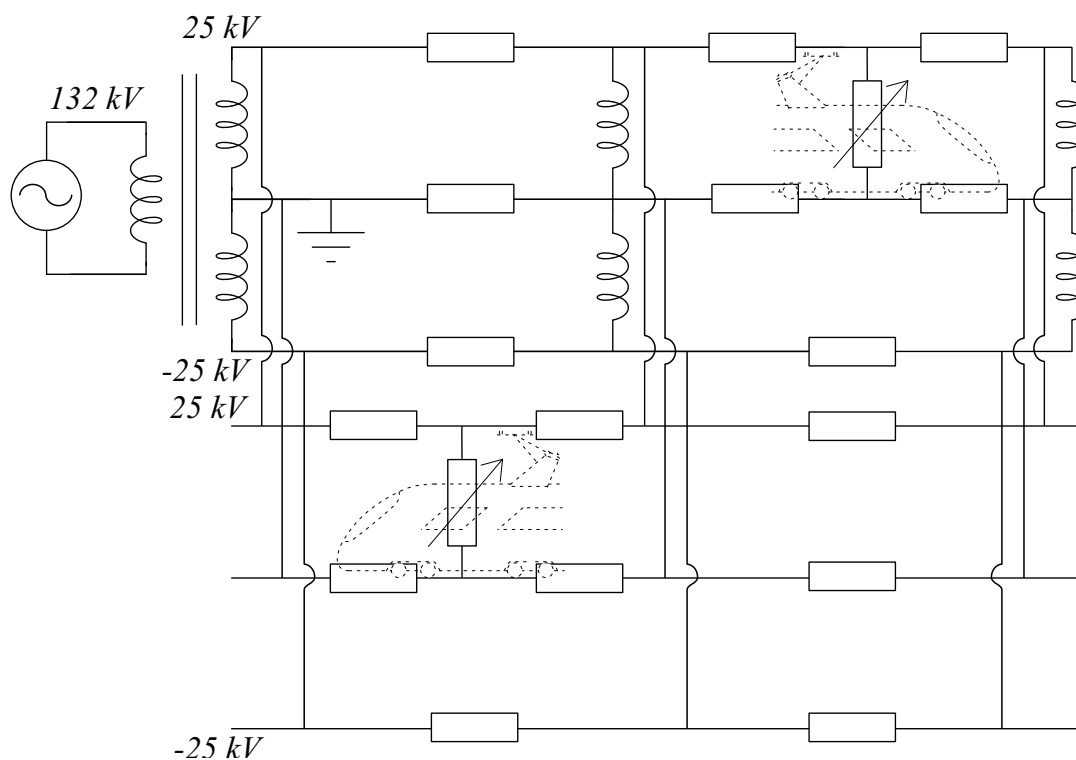
A la hora de desarrollar *RST*, una de las primeras elecciones a tomar ha sido cómo abordar el problema objeto de estudio. El objetivo de la herramienta creada no es otro que simular con un aceptable grado de realismo el movimiento de convoyes ferroviarios a lo largo de una vía. Este es el verdadero objetivo de *RST* y no otro, el tratamiento y la presentación de datos termina siendo secundario, pues lo que prima verdaderamente es conseguir recrear el flujo de potencias que acontece realmente, de manera tan minuciosa como nos sea posible.

#### 4.1.1 El Circuito Empleado

Igualmente prima la flexibilidad y generalidad del planteamiento escogido. De nada sirve conseguir desarrollar el circuito más fidedigno y detallista posible si luego no podemos extender su filosofía a todos los escenarios, casos y combinaciones posibles. Recuerde que uno de los aspectos en los que más se ha incidido a lo largo del documento ha sido la utilidad de la herramienta, y para que ciertamente sea útil debe de ser aplicable a diferentes escenarios, para poder contrastar y así tomar una decisión en base a los resultados obtenidos.

Como no podía ser de otra manera, para recrear los fenómenos que ocurren en el sistema de catenaria ante el tránsito de los trenes, se recurre a construir un modelo eléctrico, un circuito. Dicho circuito será construido a partir de los modelos desarrollados para los diferentes elementos del sistema, proceso que será descrito en mayor grado de detalle más adelante. Pero ¿Qué circuito construir? ¿Uno que abarque todo el trayecto desde la ciudad de origen hasta la de destino? ¿Otro que considere todos los tramos pertenecientes a la misma red de transporte? Las alternativas son muchas y diferentes, seguro que cada ingeniero podría plantear un enfoque único y diferente al de cualquier otro.

En este caso se ha optado por reducir el circuito modelo a un tramo, es decir, a aquella parte del trayecto alimentada por una sola SE con una combinación de fases concreta, y que es separada de las dos partes adyacentes mediante secciones neutras. La elección tomada se sustenta en que al fin y al cabo son las SE los canales que alimentan a la vía, por lo que resulta importante poder llevar a cabo de manera individualizada un estudio del impacto que supone el tránsito de un tren en las mismas.



**Figura 4.1** Diagrama simplificado del circuito base empleado para el caso de  $2 \times 25$  doble vía. Elaboración propia.

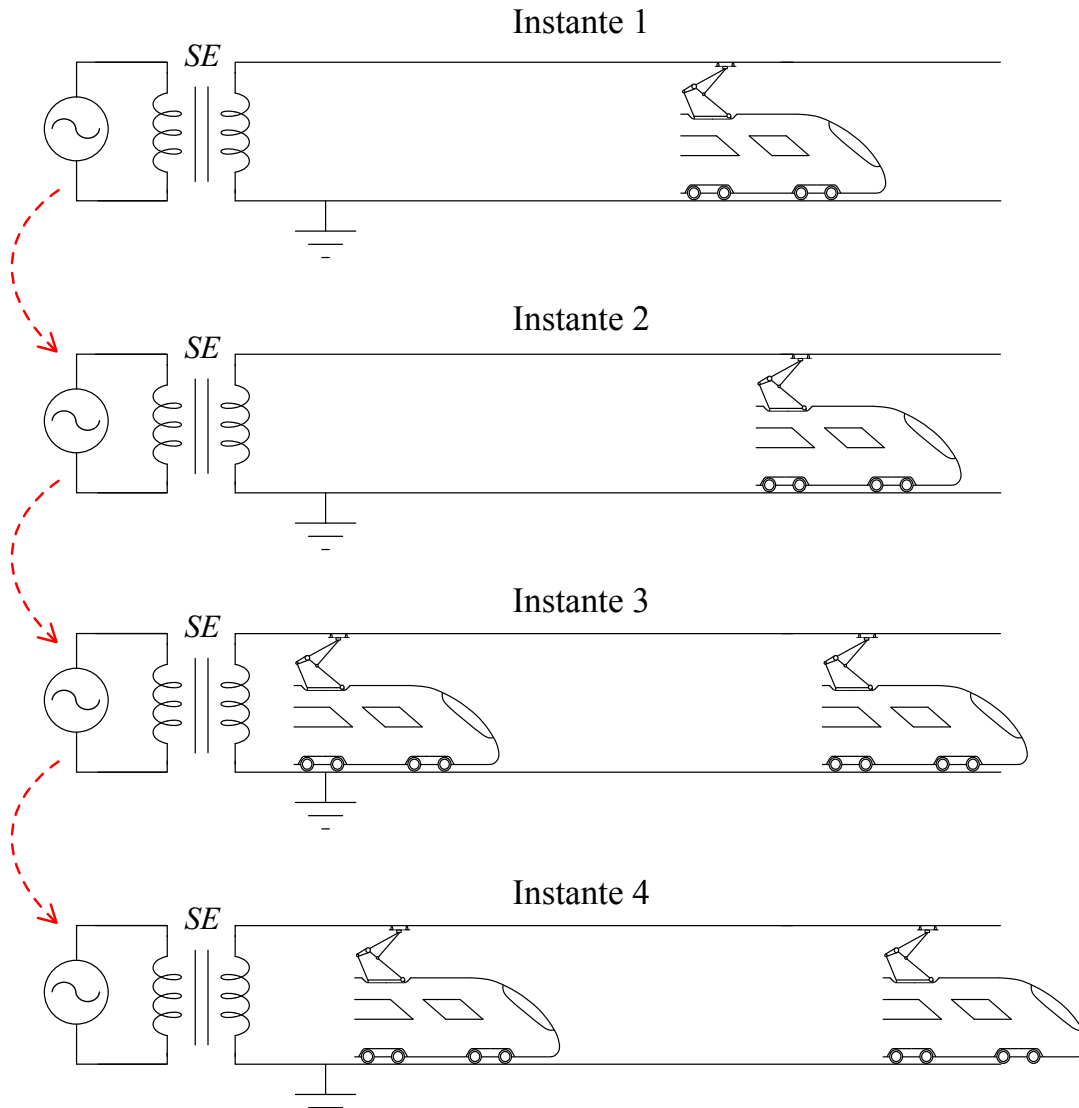
De igual manera cabe destacar que este enfoque es uno de los más simples posibles, pues considerar todo el trayecto en un solo circuito implica un muchísimo mayor grado de complejidad, la necesidad de modelar las secciones neutras (cuyo interés resulta nulo en este ámbito), resolver el problema de los trenes que sólo realizan parte del recorrido,... y conocer a qué puntos de la red de transporte están conectadas las SE, para saber así si forman parte de la misma línea o no. En lugar de todo ello, con el enfoque escogido podemos obtener los mismos resultados de manera más simple, flexible y, sobre todo, rápida; ya que al fin y al cabo el trayecto en su completitud está compuesto a base de sucesiones de tramos.

#### 4.1.2 El Movimiento de los Trenes

El circuito descrito previamente nos permite conocer, simulación mediante, el flujo de potencias resultante en un instante determinado. Una fotografía del sistema del estado de la catenaria. Pero ¿Resulta esto útil? De manera individual no, desde luego, pero al igual que un vídeo se compone íntegramente de una sucesión de fotogramas, se puede recrear el movimiento de trenes a través de la sucesión de una gran cantidad de circuitos, refiriéndose

cada uno a un estado instantáneo de la red.

Así pues, dada una resolución mínima podemos establecer una sucesión de soluciones de instantes de la red, que al ser puestas en conjunto pueden simular la evolución temporal del mismo a lo largo del tránsito de los trenes considerados. De esta manera, tal y como fue mencionado en la introducción, resulta vital para la herramienta el hecho de iterar, para así variar las condiciones de posición y consumo de potencia entre un circuito y el siguiente.

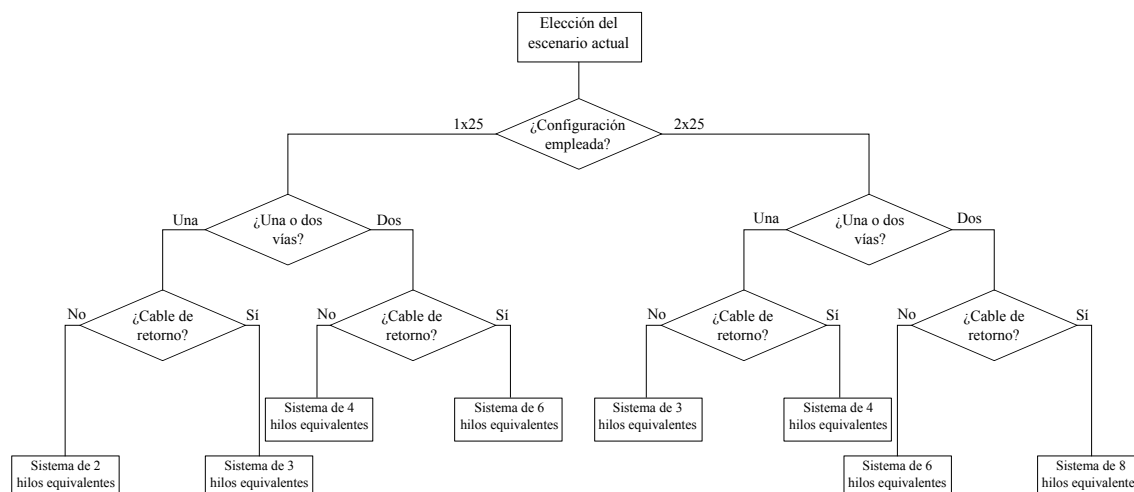


**Figura 4.2** Planteamiento adoptado para discretizar el trayecto de los trenes en varios instantes. Elaboración propia.

Así pues, en resumidas cuentas, el planteamiento que se le ha dado al problema objeto de estudio es el siguiente: se construye un circuito inicial recreando la estructura de un tramo del trayecto, desde la SE hasta la sección neutra, para simularlo una y otra vez variando la posición de las diferentes cargas presentes. Finalmente, una vez se han llevado a cabo las  $n$  simulaciones, los datos arrojados se ponen en común para mostrar el comportamiento de la catenaria a lo largo del tiempo.

## 4.2 Escenarios Considerados

Para el desarrollo del código objeto del presente documento se han tenido que reducir y estandarizar los posibles casos acontecidos en la realidad, para así poder dotar a la herramienta de cierta generalidad y amplio rango de aplicación. Ello se traduce en diferentes casos y configuraciones, los cuales dependerán exclusivamente de las decisiones del proyectista en cuanto a las características y preferencias del proyecto.



**Figura 4.3** Diagrama de flujo del proceso empleado para escoger el escenario procedente. Elaboración propia.

Para ello se han planteado diferentes clasificaciones a fin de acercar lo más posible el modelo generado por el código a aquel empleado en realidad. Como no podía ser de otra manera, la primera distinción que se lleva a cabo es **1×25 frente a 2×25**. Recuerde que la diferencia entre un caso y otro es la instalación de todo un sistema de AT y la consideración de un hilo adicional en el sistema de catenaria, el feeder.

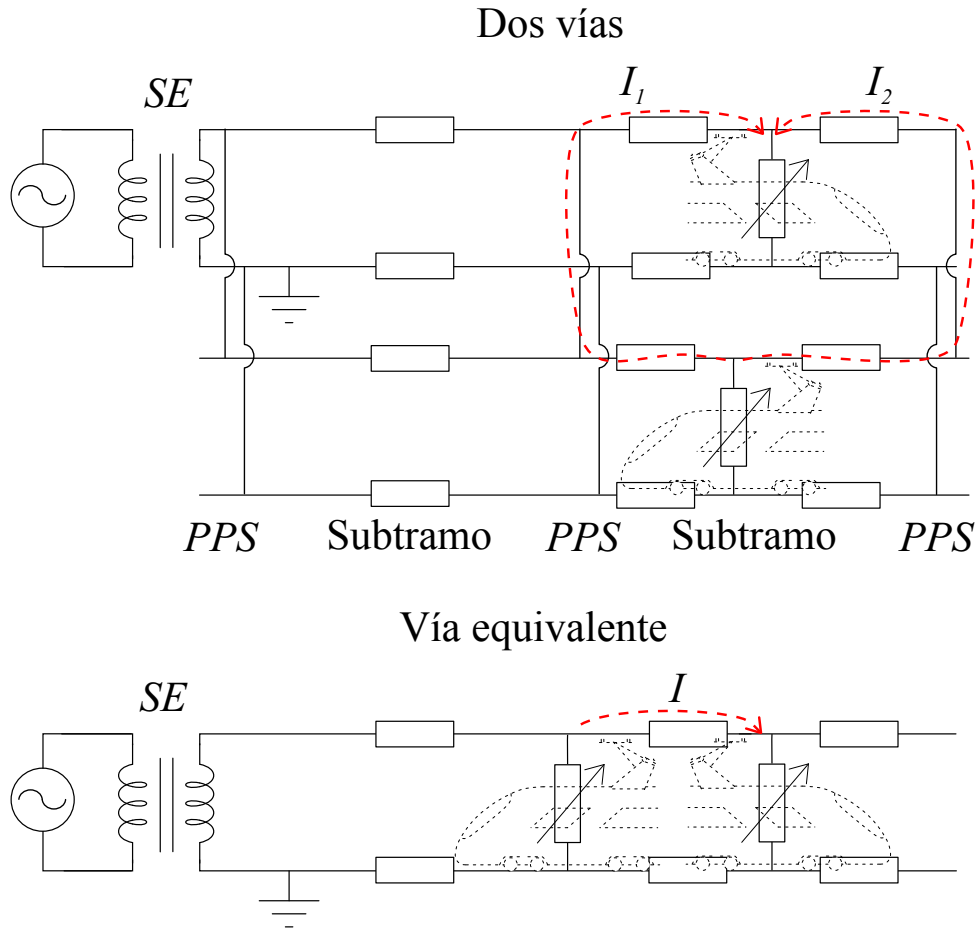
### 4.2.1 Extensión a Dos Vías

Una vez elegida la configuración empleada procede la siguiente elección: modelar el tramo de doble vía mediante **una o dos catenarias**. Puede parecer que la diferencia entre una opción y otra no tenga mucha relevancia en el marco computacional y modelístico del proyecto, pero ciertamente sí que resulta muy relevante. Ciertas herramientas del ámbito, a la hora de diseñar un trayecto de doble vía, simplemente introducen el doble de elementos en su módulo de obtención de parámetros eléctricos de catenaria ( $R$ ,  $L$  y  $C$ ), y de ahí extraen los hilos de una sola catenaria equivalente. Esto implica suponer que cada cable y su homónimo se comportan como si de una disposición dúplex se tratara, para así simplemente considerar una sola vía equivalente por la cual circulan los trenes de ambos sentidos.

Este proceder no se ha considerado oportuno ni apto bajo ninguna circunstancia debido a los siguientes motivos: si bien en las líneas múltiplex las uniones entre hilos de la misma fase se realizan cada pocos metros, en esta ocasión se llevan a cabo mediante los ya vistos PPS (o PATP para el 2×25), que acontecen cada 10 - 15 km aproximadamente;



otra razón de gran importancia es la pérdida de información valiosa en lo que respecta a la distribución de corrientes a lo largo de la catenaria.



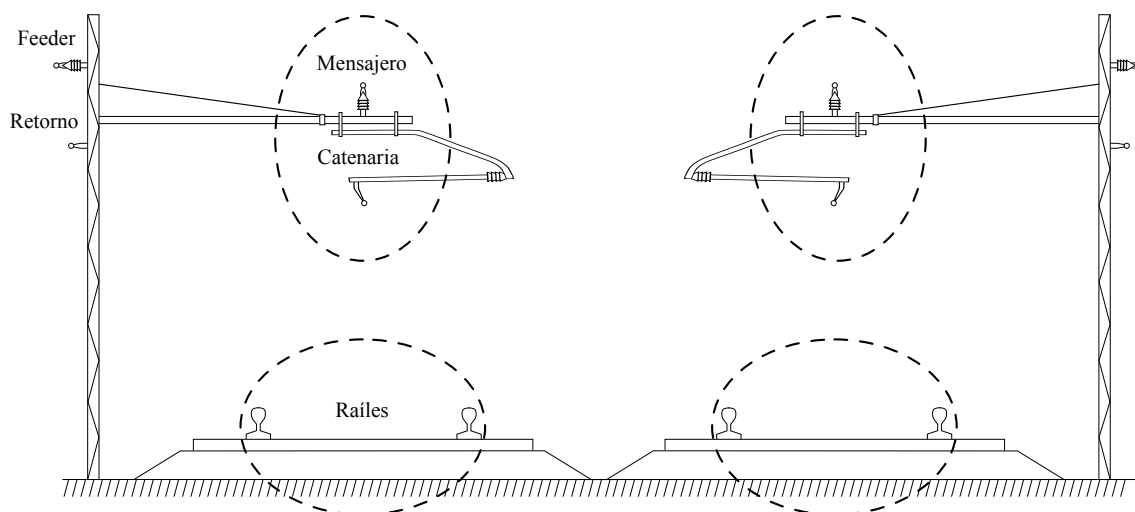
**Figura 4.4** Comparación entre los dos enfoques posibles al considerar la segunda vía en la configuración 1×25. Elaboración propia.

Para escenificar la relevancia de la elección se propone el siguiente ejemplo: considerando una única vía equivalente, si circulan dos trenes en el mismo subtramo, uno consumiendo 8 MW y el otro inyectando mediante frenada -8 MW, lo que nos indicaría el modelo es que simplemente se produce un trasvase de potencia entre un tren y otro, habiendo sólo corriente entre ambas cargas. Sin embargo, lo que sucede considerando dos vías, es que la corriente que emana del tren en frenada se ve forzada a llegar hasta un PPS o PATP primero, para después recorrer la distancia necesaria en la otra vía y entonces ser consumida por el tren a tracción. La diferencia entre un caso y otro puede llegar a ser hasta 15 km de hilo que la corriente deja de circular, lo cual en ningún caso es despreciable. Otra pérdida de información considerando una única vía equivalente es que dejamos de saber la distribución exacta de la corriente en la catenaria, lo cual para el ámbito del proyecto resulta inasumible.

### 4.2.2 Los Hilos Equivalentes

Tal y como habrá comprobado el lector, el diagrama de flujo superior se refiere a **hilos equivalentes** en lugar de a hilos simplemente. Ello se debe a que debido a la continua conexión eléctrica entre ciertos cables a lo largo de todo el tendido, resulta más que justo y simple considerar en algunas fases un único conductor equivalente antes que dos por separado.

Los hilos que siempre sufren el mencionado proceso de unión son cuatro, divididos en dos grupos: por un lado, **mensajero y catenaria**, y por otro **los dos raíles** de la vía. La unión de mensajero y catenaria resulta obvia, pues tal y como se trató en el capítulo de introducción ambos hilos se cortocircuitan cada decenas de centímetros, con una frecuencia incluso mayor que los hilos múltiplex de las líneas de transmisión.



**Figura 4.5** Hilos equivalentes considerados en el caso 2×25 doble vía. Elaboración propia.

Cuando el tren realiza el retorno de corriente, lo hace a través de los dos raíles por partes iguales, que además son cortocircuitados cada 400 - 1500 m IB mediante. Si ciertamente la frecuencia de instalación de los IB no es un discurso suficiente per se como para justificar la consideración del hilo equivalente, sí que lo es el hecho de que el tren lleve a cabo el retorno por ambas tandas de ruedas de manera más o menos aproximada. Tal es la diferencia, que cuando el usuario decide incluir el cable de retorno, éste no se incluye bajo ninguna circunstancia en el mencionado conductor equivalente, pues no se considera ni adecuado ni oportuno que sólo la unión cada 400 - 1500 m justifique la práctica. De hacerlo, además de perder precisión y calidad al llevar una unión que no procede, se perdería igualmente información al desconocer la proporción de corriente que transita por un hilo u otro.

Es oportuno igualmente añadir que a la hora de obtener los parámetros RLC de la catenaria, se realizará la reducción a un solo conductor en todas aquellas fases que, por razones del proyectista, hayan sido divididas en varios conductores. Esta práctica es habitual, por ejemplo, en el hilo de la catenaria, pues a fin de reducir la tensión mecánica se suelen emplear dos conductores en lugar de uno.

Finalmente cabe destacar que se cree acertada esta práctica, pues los diferentes artículos y estudios del ámbito normalmente llevan a cabo la misma unión en hilos equivalentes aquí realizada. De hecho, en ciertas publicaciones de considerable envergadura se desprecia

directamente un raíl, considerando que toda la corriente circula exclusivamente a través de uno de ellos, planteamiento que el autor considera poco oportuno tanto en el cálculo de los parámetros eléctricos de la catenaria como en el ámbito de la distribución de corrientes.

### 4.3 Modelado de los Elementos

En esta sección se tratará cómo se han tratado todos los elementos pertenecientes al circuito objeto de estudio, que son aquellos vistos a lo largo de los anteriores capítulos del presente documento. Para entender cómo se ha llevado a cabo el proceso de elección ha de tenerse en cuenta qué es lo que prima en este trabajo: el flujo de potencias y su distribución aguas abajo del transformador de la SE. Obviamente otorgando un alto grado de detalle a absolutamente todos los elementos involucrados (que a estas alturas el lector sabrá que no son pocos) sería como se obtendría el mejor resultado, pero también implicaría tanto un mayor tiempo de computación como grado de complejidad.

Otro hecho de obvia relevancia a la hora de modelar es el proceder propio de OpenDSS, pues todas las decisiones que tomemos en cuanto al modelado tendrán que estar enmarcadas dentro de las posibilidades que nos ofrezca el programa empleado. Afortunadamente OpenDSS ofrece al usuario establecer casi todas las variables posibles, por lo que el paso intermedio de "traducción" al código no limitará considerablemente el proceso de modelado eléctrico.

Así pues, como ya viene siendo habitual en este documento, se realizará un análisis "descendente", desde la conexión a la red de transporte hasta los hilos de la catenaria, pasando por todos los elementos involucrados y viendo así el modelado de las diferentes partes del sistema de alimentación.

#### 4.3.1 Conexión a la Red

Tanto en el capítulo de generalidades como en el de particularidades de los sistemas de alimentación se justificó la poca importancia de este nivel para el ámbito del trabajo. Recuerde que esta parte sí que es relevante en términos de continuidad, flexibilidad, y seguridad del servicio, pero para un estudio de flujo de potencias en el sistema de catenaria, como es el presente, emplear la conexión en H o T es irrelevante.

Si el objetivo de este trabajo fuera el estudio de contingencias y el impacto de las faltas en el servicio ferroviario, sí que habría sido importante modelar el tipo de conexión, pues sin duda alguna habría sido uno de los puntos de mayor peso en el circuito. En cualquiera caso, no es esta la situación que ocupa al presente trabajo.

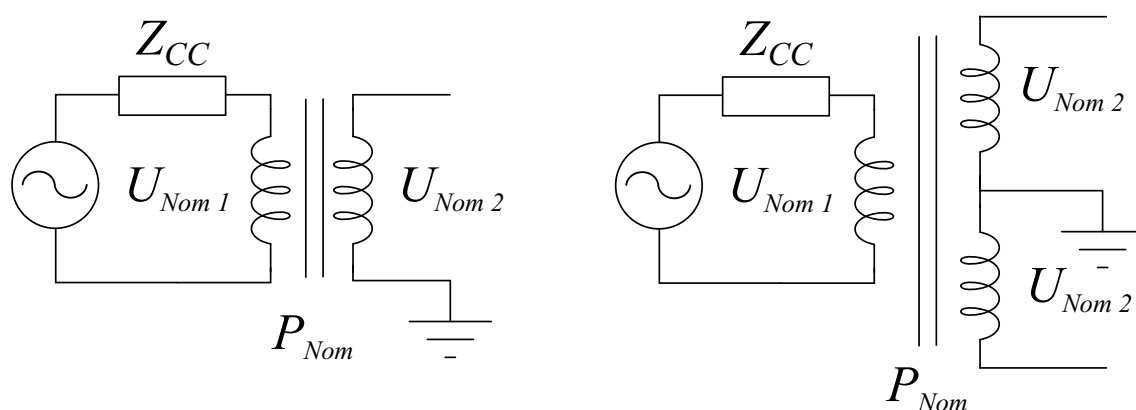
Así pues, traducido en hechos, se ha optado por simplemente despreciar esta etapa del sistema ferroviario. Esto implica que el circuito considerado comenzará directamente en la SE, la cual estará conectada a una **fuentes monofásica ideal de tensión de 132 kV** que hará las veces de red de transporte.

#### 4.3.2 La Subestación

Como ya se explicó antes, a partir de este punto es cuando da comienzo el circuito empleado como tal. En el anterior capítulo se llevó a cabo una descripción de los elementos contenidos en esta instalación, e igualmente se vio que se podían agrupar en tres grupos: elementos de medida, de protección, y de transformación. Repitiendo el discurso del apartado anterior, como el objetivo al diseñar este circuito es calcular el flujo de potencias

resultante ante el tránsito de un tren por la catenaria, se prescinden de los elementos de medida y protección, **reduciendo así toda la SE al transformador reductor**.

El transformador será pues el primer elemento de todo el circuito, y como ya se vió se encargará de reducir el nivel de tensión desde 132 kV hasta los 50 de explotación para el  $2 \times 25$  o los 25 kV del  $1 \times 25$ . El modelo escogido es el que se emplea habitualmente: un transformador ideal de la relación de transformación que proceda, precedido por una impedancia de cortocircuito a fin de modelar las pérdidas acontecidas. El modelo se caracterizará igualmente mediante los parámetros que vienen siendo habituales: **tensión de cortocircuito**  $\varepsilon_{CC}$ , **potencia nominal** de cada arrollamiento  $P_{Nom}$  y **tensiones nominales**  $U_{Nom1}$  y  $U_{Nom2}$ . Otros parámetros secundarios serán autocompletados con los datos por defectos de OpenDSS, tal y como indica el proceder del programa.



**Figura 4.6** Modelos simplificados de transformador empleados. Elaboración propia.

**Tabla 4.1** Valores habituales de los parámetros del transformador de la SE, empleados por defecto en RST.

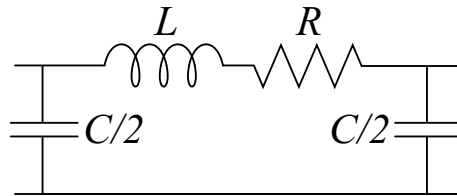
Parámetro	1x25	1x25	2x25	2x25
	Una vía	Dos vías	Una vía	Dos vías
$P_{Nom}$ (MVA)	20	40	30	60
$\frac{U_{Nom1}}{U_{Nom2}}$	$\frac{132}{27'5}$		$\frac{132}{2 \times 27'5}$	
$\varepsilon_{CC}$	8 %		10 %	

Habitualmente el transformador se conectará al cable de retorno, ya que para ello se instala, pero si no se dispone de dicho hilo, se conectará a los raíles en su lugar.

### 4.3.3 Sistema de Catenaria

Como ya sabrá el lector, justo tras los arrollamientos secundarios del transformador da comienzo el sistema de catenaria propiamente. Tal y como fue visto anteriormente, éste está compuesto tanto por una serie de hilos suspendidos como por ciertos puestos que se instalan periódicamente. Así pues, junto con el tren como carga eléctrica, esos dos conjuntos de elementos son los que tendremos que modelar a este nivel de la red.

Los hilos de la catenaria se modelan mediante una **línea eléctrica en disposición  $\Pi$** , como es habitual en la mayoría de los casos. Para caracterizar el modelo de línea se emplearán los tres parámetros empleados en la mayoría de ocasiones: la matriz de **resistencias**  $R$ , la de **inductancias**  $L$ , y el escalar de **capacidad**  $C$ , todos ellos haciendo referencia a valores por unidad de longitud.



**Figura 4.7** Modelo de línea eléctrica en  $\Pi$  empleado. Elaboración propia.

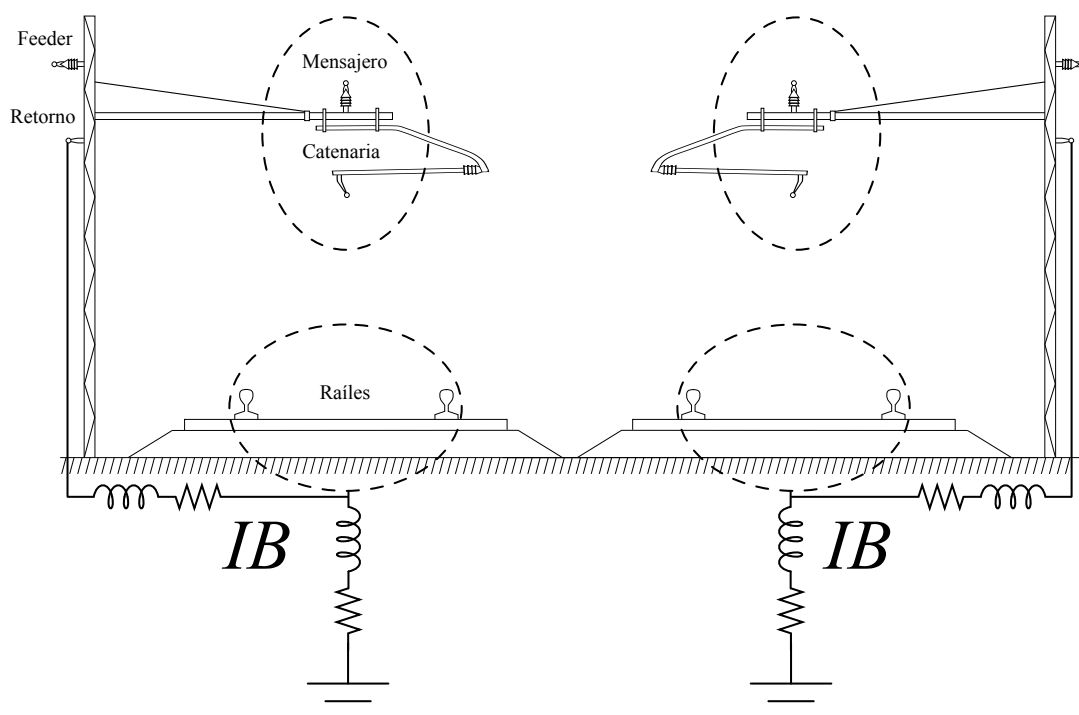
**Dicho modelo se aplica a todos los hilos equivalentes por separado**, por lo que se podrá caracterizar cada conductor de manera individualizada, teniendo cada uno una tanda de parámetros eléctricos única y propia, que más tarde se verá cómo se obtienen.

Así pues, para constuir el circuito **se divide la catenaria en las ya vistas celdas**, recuerde, unidades estructurales mínimas e inalterables del tamaño de 400 - 1500 m según el proyecto. En el interior de esta celda los hilos permanecen tal cual sin alteración alguna y sin ser conectados entre sí bajo ninguna circunstancia. La única razón por la cual una celda puede interrumpirse será por la propia presencia de un tren, primando la exactitud de la posición de la carga antes que la generalidad de la estructura.

Para establecer las conexiones entre los hilos de la catenaria y otros elementos, se consideran los diferentes puntos auxiliares estudiados en el apartado de generalidades. Estos puestos se ubican entre una celda y otra, y recuerde son: IB, PPS, RPP, DPP y PATP o DPATP. De dichos puntos auxiliares, **se han despreciado** los efectos en términos de flujo de potencia del **RPP** y del **DPP** ¿Por qué estos puntos y el resto no, cuando todos emplean cables? La decisión se basa fundamentalmente en dos aspectos: el primero es que dichos puntos no tienen función alguna en un trayecto normal sin incidentes, sólo entrando en juego cuando hay un tramo fallido o algo similar, por lo que no hay necesidad de incluirlos para recrear algún efecto (como sí es el caso del IB, que reparte la corriente entre los diferentes hilos a tierra); mientras que la segunda razón es que los cables que emplean son contundentemente más cortos que aquellos del IB o PATP, por ejemplo, ya que los propios DPP y RPP se instalan sobre la catenaria, introduciendo así una impedancia mucho menor que el resto de puestos ¿Se podrían haber incluido? Sin ningún género de dudas, pero ello apenas habría introducido diferencia alguna (si la hubiera supuesto) y habría aumentando innecesariamente la pesadez del código. Así pues, en el ámbito de este proyecto, en lo que respecta a los puntos auxiliares, se va a centrar la atención en el modelado del **IB, PPS y PATP/DPATP**.

Para **modelar las conexiones físicas** que acontecen en los diferentes puntos auxiliares se emplearán **paquetes impedantes** de valor  $0'01 + 0'01j\Omega$  a título significativo. Ciertamente la impedancia asignada podría ser otra cualquiera de igual orden, al igual que se podrían haber ignorado el efecto de los cables. Todas alternativas han sido desechadas por una simple razón: para el orden de magnitud que estamos tratando (decenas de kilómetros de hilos que distan de ser ideales), los cables bien podrían terminar siendo despreciados

debido al pequeño peso que representan; pero en lugar de ello se ha preferido dar un valor típico, para así aumentar el grado de detalle sin sacrificar la velocidad y manejabilidad del código. Así pues, los puestos auxiliares previamente listados estarán compuestos en su mayoría por conexiones de  $0'01 + 0'01j\Omega$  y los elementos característicos pertinentes.



**Figura 4.8** Modelo del IB en una catenaria del 2x25. Elaboración propia.

La interrupción eléctrica que acontece de manera más frecuente sin lugar a dudas es el **IB**. Recuerde que sirve para homogeneizar la distribución de corrientes entre los raíles, y si se dispone de hilo de retorno, para redirigir la corriente hacia el mismo. Estos IB se posicionan entre celda y celda, cada 400-1500 m, y se modelan tal y como muestra la figura adjunta: ubicando un paquete de  $0'01 + 0'01j\Omega$  entre retorno y raíles, y otro entre los carriles y la puesta a tierra.

En el caso de los IB, las uniones de  $0'01 + 0'01j\Omega$  no sólo modelan el cable empleado per se, sino también la impedancia que supone establecer el filtro de paso bajo descrito en el apartado de generalidades. Precisamente relativo a este aspecto, una labor muy importante que llevan a cabo los IB en el circuito modelo es la **puesta a tierra**. Los diferentes IB a lo largo del camino suponen la única conexión que refiere el circuito al valor de referencia "tierra", lo cual tiene dos repercusiones: la primera es que parte de la corriente se "fugará" y circulará por tierra, y la segunda es que habrá tramos de raíl que no estén a 0 V, debido precisamente a la caída de tensión efecto de la circulación de la corriente de retorno. Por otro lado, para caracterizar la impedancia propia de la puesta a tierra, se ha tomado como valor de referencia por defecto  $2\Omega$ , cantidad habitualmente empleada en los estudios del presente ámbito que habrá que sumar a los  $0'01 + 0'01j\Omega$ .

Un punto auxiliar que sólo se emplea en los casos de doble vía es el **PPS**. La razón es obvia, pues el único cometido de este punto es efectivamente conectar los hilos de ambas vías entre sí. Cabe especificar que en el sistema  $2 \times 25$  el PPS se instalará justo a la vez que

el puesto de AT, haciendo también las veces de conexión a los AT. En cualquier caso, el modelo escogido se basa únicamente en meter cables de  $0'01 + 0'01j\Omega$  entre las fases de la vía alimentada y las de segunda. Si no se considerara el cable de retorno, el PPS uniría los raíles entre sí.

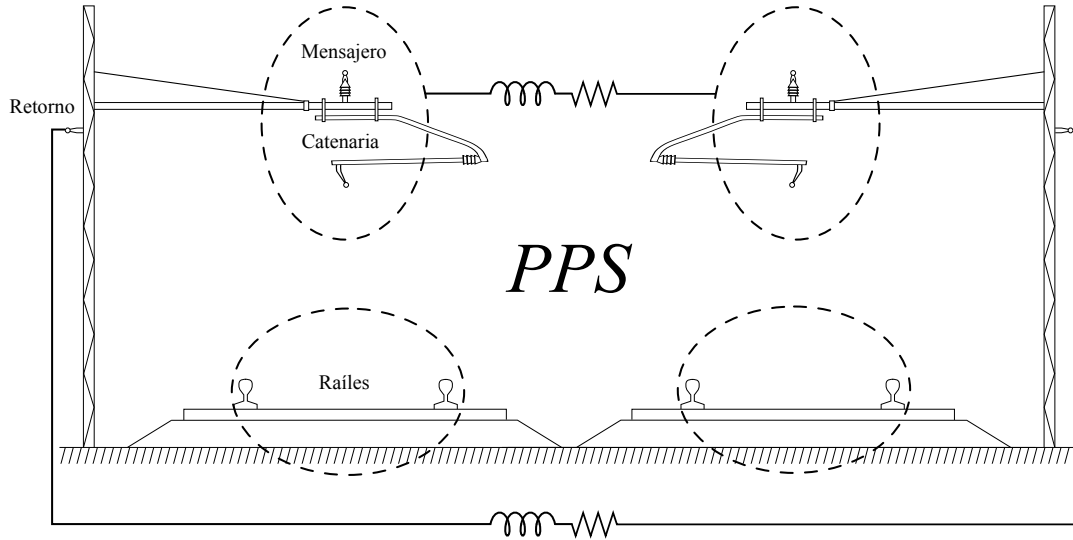


Figura 4.9 Modelo del PPS. Elaboración propia.

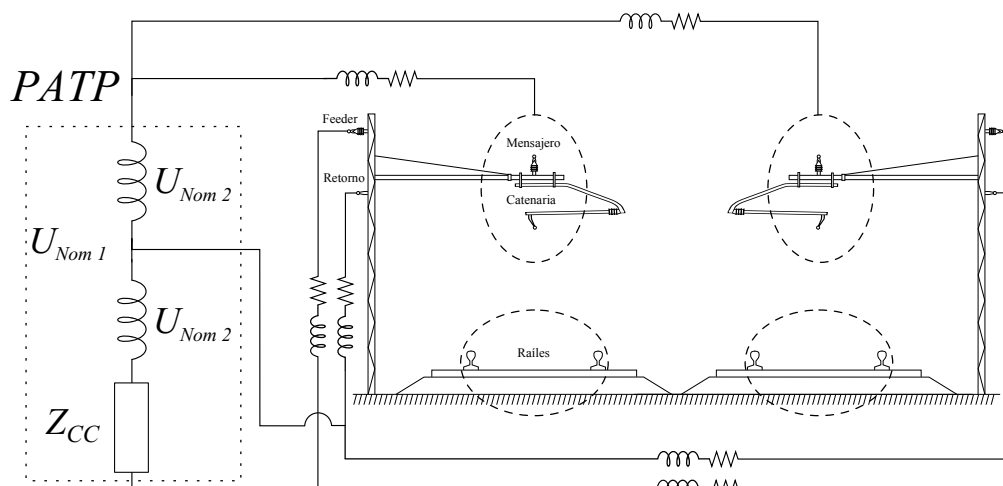
Tabla 4.2 Valores habituales de los parámetros del conjunto de AT, empleados por defecto en *RST*.

Parámetro	Una vía	Dos vías
$P_{nom}$ (MVA)	10	15
$\frac{U_{Nom1}}{U_{Nom2}}$		$\frac{55}{27'5}$

Así pues, en lo que a los puntos auxiliares respecta, solamente faltaría por tratar el **modelado del PATP/DPATP**. Huelga decir que resulta absolutamente irrelevante si la técnica empleada es una u otra, pues en lo que concierne al flujo de potencia no tiene relevancia alguna que ambos AT se ubiquen dentro del mismo recinto o no. Así pues, al igual que se ha hecho en casos anteriores, lo que acontece en esta ocasión es la conexión mediante cables de  $0'01 + 0'01j\Omega$  a los hilos en cuestión (parte que correspondería al mencionado PPS). De la misma manera, si no se dispone del cable de retorno en el sistema, la conexión se hará a los raíles en su lugar.

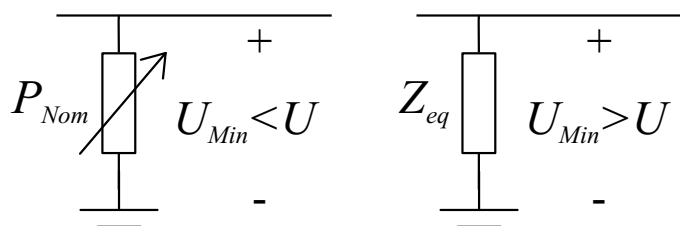
El puesto de AT ha sido modelado exactamente igual que el transformador, empleando una impedancia de cortocircuito que precede a un AT ideal. Así pues, también se utilizan las mismas variables para caracterizar la máquina: **tensión de cortocircuito**  $\varepsilon_{CC}$ , **potencia nominal** de cada arrollamiento  $P_{Nom}$  y **tensiones nominales**  $U_{Nom1}$  y  $U_{Nom2}$ . En esta ocasión, tal y como fue descrito con anterioridad, la potencia nominal variará entre los 10

y 15 MVA, siendo siempre  $\varepsilon_{CC} = 1\%$  y los niveles de tensión los que ya conocemos.



**Figura 4.10** Modelo del PATP, haciendo las veces de PPS. Elaboración propia.

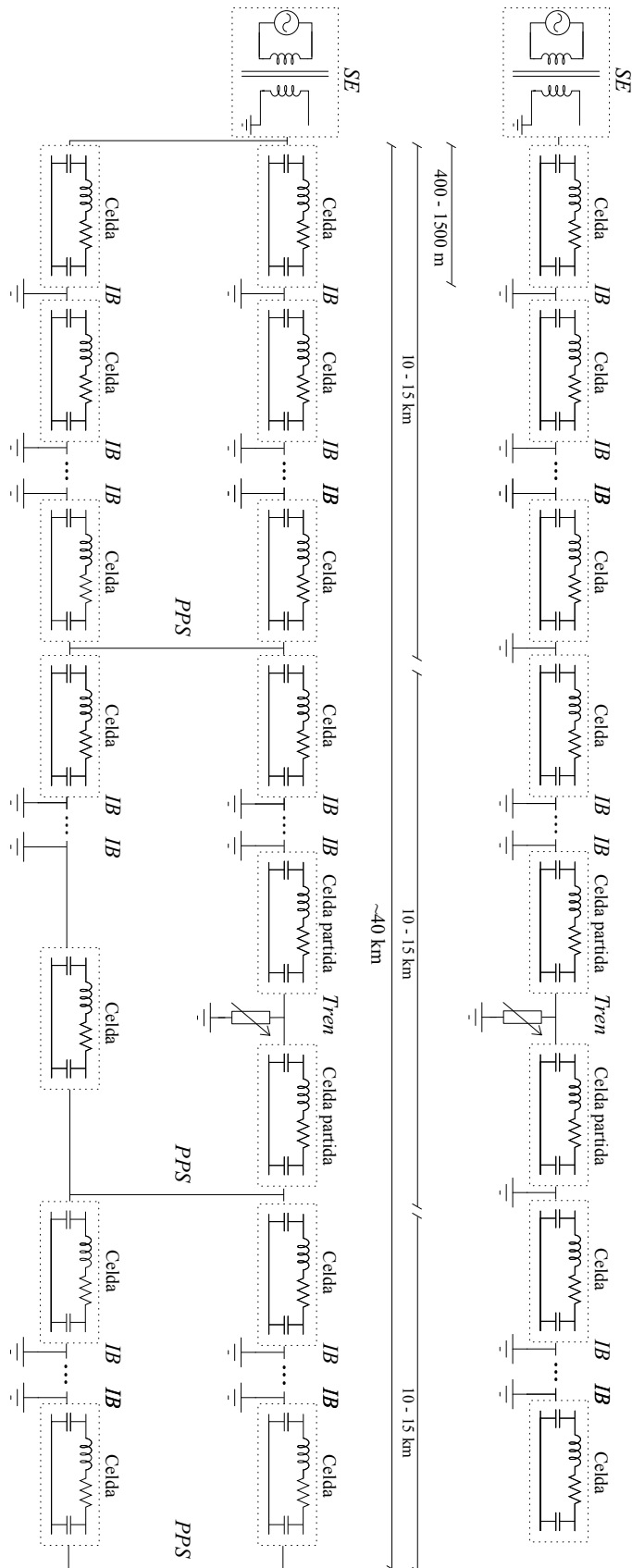
Finalmente el único elemento que faltaría por modelar es el propio **tren**. Dado que la potencia consumida en cada instante es un dato de entrada, basta que el modelo a hacer sea una impedancia de consumo constante de potencia. Dicha carga será emplazada entre el hilo equivalente mensajero-catenaria y el de los dos raíles, nunca estando en contacto con el cable de retorno ni feeder. Para modelar la carga contamos con los siguientes parámetros: **tensión de contacto nominal**  $U_{Nom}$ , **factor de potencia**  $f_{dp}$ , **tensión mínima de contacto**  $U_{Min}$ , y **potencia nominal**  $P_{Nom}$ . En el caso presente la tensión de contacto nominal será de 25 kV, teniendo como factor de potencia 0'995 pu, tensión mínima de contacto 0'8 pu (nivel bajo el cual la carga se comportará como una **impedancia de valor constante**) y potencia nominal lo que indique el usuario. Los valores indicados han sido escogidos según los empleados en la mayoría de artículos y estudios del ámbito en cuestión.



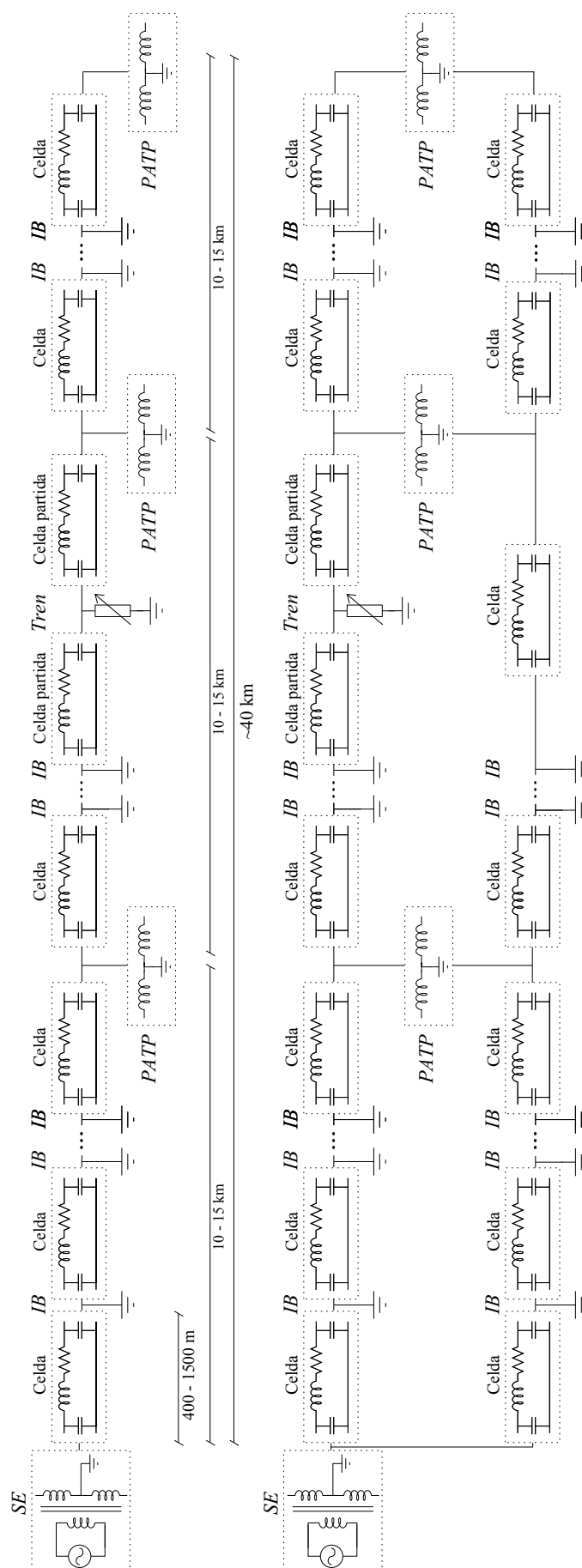
**Figura 4.11** Modelo del tren en los dos escenarios posibles. Elaboración propia.

Así pues, de esta manera termina el repaso al modelado de los diferentes elementos involucrados en los circuitos objetos de estudio. Los parámetros aquí mostrados, empleados para caracterizar cada elemento, son aquellos igualmente utilizados en el modelado en OpenDSS. El hecho de que otras variables no se mencionen no implica que sean despreciadas o ignoradas, por ello mismo se invita al lector a echar un vistazo al manual de OpenDSS para ver en mayor grado de detalle cómo el software trata cada elemento, y así comprobará el alto grado de detalle al que se llega simplemente introduciendo los parámetros aquí ya vistos.





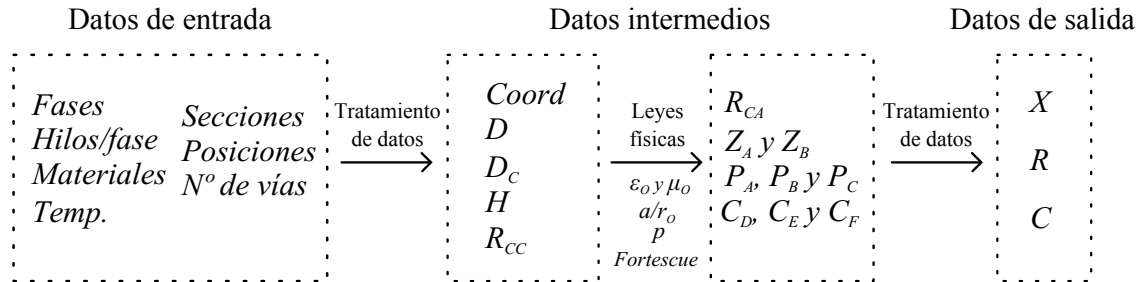
**Figura 4.12** Modelos generales de la configuración 1×25. Elaboración propia.



**Figura 4.13** Modelos generales de la configuración 2×25 doble vía. Elaboración propia.

## 4.4 Cálculo de los Parámetros Eléctricos de la Catenaria

Finalmente se cierra el capítulo presente haciendo especial mención al cálculo llevado a cabo en el código para obtener los parámetros eléctricos de la catenaria. El objetivo de esta sección es ilustrar al lector sobre el proceso escogido, pues se considera que tiene en cuenta suficientes particularidades como para ser digno de explicación.



**Figura 4.14** Proceder general simplificado en el cálculo de los parámetros eléctricos. Elaboración propia.

### 4.4.1 Información Necesaria

Para poder desarrollar el proceso de cálculo se necesita cierta **información mínima**, como no podía ser de otra manera. El usuario debe de facilitar la **cantidad de fases** consideradas (configuración  $1 \times 25$  una fase,  $2 \times 25$  dos fases), la **cantidad de cables por fase** (puede ser que se haya decidido duplicar catenaria y mensajero para reducir la tensión mecánica sufrida), **posición de los conductores**, **sección** de los hilos, el **material** de los mismos y la **temperatura** de empleo. Si el usuario no constara con la información necesaria, también se ofrecería la oportunidad de emplear datos típicos por defecto. Otro detalle importante es saber si el usuario quiere obtener los parámetros de una **catenaria de dos vías**, pues habrá que **duplicar la información** recibida sabiendo el espacio entre los raíles internos.

Respecto a los materiales considerados por la herramienta, se han escogido aquellos de empleo más común en la manufactura de los hilos que conforman la catenaria, es eso: **cobre** *Cu*, **aluminio** *Al*, núcleo de **acero** y corona de **aluminio** *Al+Ac*, y **acero** *Ac*. Como ya fue mencionado, el cobre se utiliza especialmente en los cables a tensión, como son catenaria, mensajero y feeder. El aluminio queda relegado a los cables conectados a tierra, empleando el núcleo de acero si se dan problemas mecánicos de deformación plástica. Finalmente, el acero queda exclusivamente relegado a la creación de los raíles.

Una vez se tienen los datos de entrada se construyen las matrices típicas empleadas en el cálculo de los parámetros eléctricos: La **matriz de posiciones** *Coord*, de dimensión  $n \times 2$  (siendo  $n$  la cantidad de hilos total), donde la primera columna indica la posición horizontal del hilo, mientras que la segunda la posición vertical del mismo,  $Coord_i = (x_i, h_i)$ . La **matriz de distancias** *D* de tamaño  $n \times n$ , teniendo en cada elemento la distancia entre los dos conductores correspondientes, menos en la diagonal, donde tendrá el radio del hilo respectivo. La matriz de **distancia para la capacidad**  $D_C$  será igual que *D*, pero no contará con los elementos a ras de suelo (más adelante se justificará por qué), siendo habitualmente de dimensión  $(n - \text{raíles}) \times (n - \text{raíles})$ . Igualmente empleada exclusivamente para el cálculo de la capacidad, la matriz *H* contendrá la **distancia a del hilo de la catenaria**

**original al de aquella simétrica subterránea** de todos los elementos, menos aquellos yacientes en el suelo, otra vez de tamaño  $(n - \text{railes}) \times (n - \text{railes})$ .

Adicionalmente se emplearán otros parámetros como la **profundidad compleja**  $P$ , las **resistividades**  $\rho$  de cada material, los **coeficientes de temperatura**  $\alpha$  para cada material referidos a  $20^\circ\text{C}$ , la **permeabilidad magnética** en el vacío  $\mu_0$  y la **permitividad** en el vacío  $\epsilon_0$ . Igualmente se empleará el **cociente entre el radio y el radio ficticio**  $\frac{a}{r_0}$  para la obtención de la resistencia a CA. A continuación se adjuntan las fórmulas oportunas para la obtención de los mencionados parámetros, así como los valores tomados para las propiedades de los materiales y la tabla que relaciona  $\frac{a}{r_0}$  con  $\frac{R_{CC}}{R_{CA}}$ :

$$\frac{a}{r_0} = 0'050133 \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{R_{CC}}} \quad p = \frac{355 \cdot \sqrt{\rho_{\text{suelo}}}}{\sqrt{f \cdot j}} \quad m$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2} \quad \epsilon_0 = 8.854188 \cdot 10^{-12} \text{F} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$\alpha_{Cu} = 3'82 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \quad \alpha_{Al} = 3'93 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1} \quad \alpha_{Al+Ac} = 3'93 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

$$\alpha_{Ac} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

$$\mu_{r,Cu} = 1 \quad \mu_{r,Al} = 1 \quad \mu_{r,Al+Ac} = 1 \quad \mu_{r,Ac} = 5$$

$a/r_0$	$R'_{ca}/R'_{cc}$	$a/r_0$	$R'_{ca}/R'_{cc}$	$a/r_0$	$R'_{ca}/R'_{cc}$	$a/r_0$	$R'_{ca}/R'_{cc}$
0,0	1,00000	1,0	1,00519	2,0	1,07816	3,0	1,31809
0,1	1,00000	1,1	1,00758	2,1	1,09375	3,1	1,35102
0,2	1,00001	1,2	1,01071	2,2	1,11126	3,2	1,38504
0,3	1,00004	1,3	0,01470	2,3	1,13069	3,3	1,41999
0,4	1,00013	1,4	1,01969	2,4	1,15207	3,4	1,45570
0,5	1,00032	1,5	1,02582	2,5	1,17538	3,5	1,49202
0,6	1,00067	1,6	1,03323	2,6	1,20056	3,6	1,52879
0,7	1,00124	1,7	1,04205	2,7	1,22753	3,7	1,56587
0,8	1,00212	1,8	1,05240	2,8	1,25620	3,8	1,60314
0,9	1,00340	1,9	1,06440	2,9	1,28644	3,9	1,64051

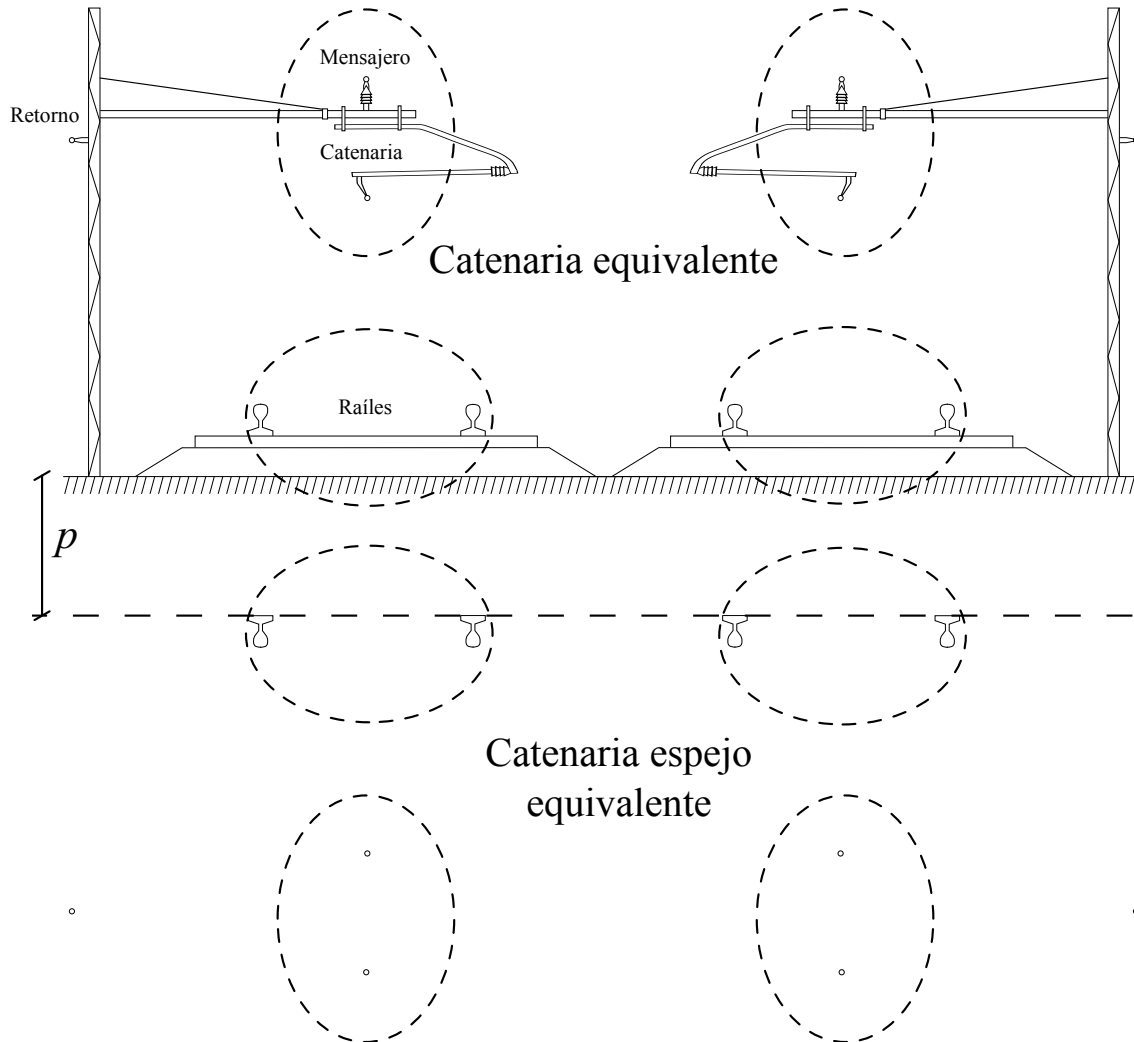
**Figura 4.15** Relación entre  $R_{CC}$  y  $R_{CA}$  según los valores de  $\frac{a}{r_0}$ . Fuente: [13].

#### 4.4.2 Retorno por Tierra

Como habrá observado el lector, se ha hecho mención a la denominada como profundidad compleja. Dicha variable proviene del método homónimo empleado para la cuantificación del impacto que tiene el retorno por tierra en la impedancia de la línea. Hay muchos enfoques diferentes a la hora de parametrizar el mencionado fenómeno, desde la consideración de la tierra como sustratos de diferente resistencia, aquel propuesto por Carson en su artículo,... De todos los métodos existentes se ha optado por aquel que modela el efecto del retorno de corriente por tierra mediante una línea simétrica ubicada bajo tierra a una profundida compleja  $p$ . La elección se basa en que este actualmente uno de los enfoques que mejores resultados arroja, asemejándose al comportamiento real.

Ciertamente el retorno por tierra es de gran importancia en los sistemas ferroviarios,

pues tal y como fue mencionado aproximadamente el 25 % de la corriente de retorno tiende a circular por tierra en lugar de por los raíles. Este hecho, sumado a la cercanía de los hilos a tierra, confiere especial importancia al fenómeno de alteración de la impedancia por parte de la corriente de retorno.



**Figura 4.16** Sistema empleado por el método de la profundidad compleja en una configuración 1×25. Elaboración propia.

Por otra parte, para incluir el efecto del retorno de corriente por la tierra en la capacidad  $C$  de la línea se ha escogido el método habitual, que considera una catenaria simétrica subterránea (esta vez sin profundidad compleja alguna) donde la carga de cada cable es justo la opuesta a la del original respectivo.

#### 4.4.3 Cálculo de la Resistencia y la Reactancia

Se procede a tratar el proceso de cálculo de la **reactancia  $X$  y resistencia  $R$** , pues si bien sufren el mismo desarrollo, éste será absolutamente análogo al que se lleva a cabo de manera manual, cosa que no ocurre con la capacidad  $C$ .

Antes de abordar el cálculo de la primera matriz de impedancia,  $Z_A$ , la cual no tendrá todavía hilo alguno agrupado, es necesario llevar a cabo la obtención de la resistencia a

CA a partir de  $R_{CC}$  y  $\frac{a}{r_o}$ , a través de la tabla de relación previamente mencionada:

$$R_{CCi} = \frac{\rho_i}{\pi \cdot Radio_i} \cdot (1 + \alpha_i \cdot (T - 20))$$

$$\frac{a}{r_o} = 0'050133 \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \mu_r}{R_{CC}}} \rightarrow \parallel Tabla \quad \frac{a}{r_o} \longleftrightarrow \frac{R_{CA}}{R_{CC}} \parallel \rightarrow R_{CA}$$

Una vez se tiene el valor de la resistencia, se puede obtener la primera matriz  $Z$ , la cual todavía no tiene ningún hilo agrupado:

$$Para \forall i \text{ y } j, \text{ dado } i = j: \quad Z_{A,ij} = R_{CA} + j \cdot 2\pi f \cdot \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \log \left( \frac{2 \cdot h_i + p}{D_{ij}} \right)$$

$$Para \forall i \text{ y } j, \text{ dado } i \neq j: \quad Z_{A,ij} = j \cdot 2\pi f \cdot \frac{\mu_o}{2\pi} \cdot \log \left( \frac{\sqrt{(h_i + h_j + 2 \cdot p)^2 + (x_i + x_j)^2}}{D_{ij}} \right)$$

A continuación se muestra el aspecto que tendrá la obtenida matriz  $Z_A$  para el caso de la configuración  $2 \times 25$ . Se le permitirá al autor la consideración de que todos los hilos son simplex (situación en cualquier caso más habitual) en un brindis a la simplicidad y fácil lectura de la matriz, al igual que la consideración de una única vía en lugar de dos. Para ello se empleará la siguiente notación:  $M$  para el mensajero,  $C$  como catenaria,  $R$  para el cable de retorno,  $F$  como feeder,  $Ri$  para el raíl izquierdo y  $Rd$  para el derecho.

$$Z_A = \begin{bmatrix} Z_{A,MM} & Z_{A,MC} & Z_{A,MF} & Z_{A,MR} & Z_{A,M Ri} & Z_{A,M Rd} \\ Z_{A,CM} & Z_{A,CC} & Z_{A,CF} & Z_{A,CR} & Z_{A,C Ri} & Z_{A,C Rd} \\ Z_{A,FM} & Z_{A,FC} & Z_{A,FF} & Z_{A,FR} & Z_{A,F Ri} & Z_{A,F Rd} \\ Z_{A,RM} & Z_{A,RC} & Z_{A,RF} & Z_{A,RR} & Z_{A,R Ri} & Z_{A,R Rd} \\ Z_{A,RiM} & Z_{A,RiC} & Z_{A,RiF} & Z_{A,RiR} & Z_{A,Ri Ri} & Z_{A,Ri Rd} \\ Z_{A,RdM} & Z_{A,RdC} & Z_{A,RdF} & Z_{A,RdR} & Z_{A,Rd Ri} & Z_{A,Rd Rd} \end{bmatrix} \Omega/m$$

Así pues se obtiene la matriz de impedancia  $Z_A$ , pero no será aquella de nuestro interés todavía, pues tal y como fue razonado en este mismo capítulo se ha optado por considerar ciertos hilos equivalentes en lugar de todos los conductores de manera individualizada. La siguiente matriz a determinar será  $Z_B$ , siendo la única diferencia entre esta segunda matriz y la primera que se han agrupado los diferentes elementos pertenecientes a la misma fase y cuya unión proceda. Así pues todos los hilos de todas las fases serán reducidos a uno solo equivalente, menos la fase tierra, ya que tal y como se mencionó previamente no procede la agrupación entre raíles y cable de retorno. De esta manera, como mínimo habrá que llevar a cabo la unión de los hilos de catenaria con los del mensajero y la de los raíles entre sí, siempre cada vía por separado. Siguiendo con el ejemplo previo, las ecuaciones de agrupación resultarían:

$$Z_{A,CC}^* = \frac{1}{4} \sum_{i=M,C} \left( \sum_{j=M,C} Z_{A,ij} \right) \quad Z_{A,MF}^* = Z_{A,FM}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=M,C} \left( \sum_{j=F} Z_{A,ij} \right)$$

$$Z_{A,MR}^* = Z_{A,RM}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=M,C} \left( \sum_{j=R} Z_{A,ij} \right) \quad Z_{A,MRI}^* = Z_{A,RiM}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=M,C} \left( \sum_{j=Ri} Z_{A,ij} \right)$$

$$Z_{A,Mrd}^* = Z_{A,RdM}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=M,C} \left( \sum_{j=Rd} Z_{A,ij} \right)$$

$$Z_{A,RaRa}^* = \frac{1}{4} \sum_{i=Ri,Rd} \left( \sum_{j=Ri,Rd} Z_{A,ij} \right) \quad Z_{A,RaM}^* = Z_{A,MRa}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=Ri,Rd} \left( \sum_{j=M} Z_{A,ij}^* \right)$$

$$Z_{A,RaF}^* = Z_{A,FaR}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=Ri,Rd} \left( \sum_{j=F} Z_{A,ij}^* \right) \quad Z_{A,RaR}^* = Z_{A,RRa}^* = \frac{1}{2} \sum_{i=Ri,Rd} \left( \sum_{j=R} Z_{A,ij}^* \right)$$

Tras realizar las agrupaciones pertinentes obtenemos la matriz  $Z_B$ , dividida ya en los hilos equivalentes empleados para construir el modelo de la catenaria. Una vez se tiene  $Z_B$ , basta con separar la parte imaginaria de la real para así finalmente obtener  $X$  y  $R$  respectivamente:

$$Z_B = \begin{bmatrix} Z_{B,MM} & Z_{B,MF} & Z_{B,MR} & Z_{B,MRa} \\ Z_{B,FM} & Z_{B,FF} & Z_{B,FR} & Z_{B,FRa} \\ Z_{B,RM} & Z_{B,RF} & Z_{B,RR} & Z_{B,RRa} \\ Z_{B,RaM} & Z_{B,RaF} & Z_{B,RaR} & Z_{B,RaRa} \end{bmatrix} \Omega/m$$

$$R = \Re\{Z_B\} \quad \Omega/m \quad X = \Im\{Z_B\} \quad \Omega/m$$

Como se puede observar a lo largo del proceso no ha habido ningún paso en especial, sino que es absolutamente análogo al método indicado por la teoría del cálculo de parámetros. Estas dos matrices obtenidas serán directamente las empleadas en OpenDSS para llevar a cabo la simulación.

#### 4.4.4 Cálculo de la Capacidad

Este apartado es el principal motivo por el cual se ha decidido incluir la presente sección en el trabajo, y es que, a diferencia del cálculo relativo a  $R$  y  $X$ , hay varios detalles y decisiones tomadas que merecen explicación.

En líneas generales, lo que hay que explicar es cómo se ha decidido proceder cuando como poco cuatro conductores del sistema están a ras de suelo ¿Qué problema implica? Pues que para calcular la capacidad, se parte de la matriz de potenciales eléctricos, cuyos elementos obedecen a la siguiente expresión, la cual tiene en cuenta la catenaria subterránea para el retorno por tierra:

$$\text{Para } \forall i \text{ y } j: P_{A,ij} = P_{A,ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \cdot \log \left( \frac{H_{ij}^*}{D_{ij}} \right) \quad m/F$$

Si a la hora de construir la matriz  $H$  se tuvieran en cuenta todos los elementos, como se

hace de manera habitual, obtendríamos que el potencial de ciertos conductores, concretamente el de los raíles, resultaría cero al ser  $\log(0) = -\infty$ . Como el lector podrá suponer esto acarreará problemas computacionales, pues si ya de por sí la existencia de "infinitos" nunca es indicio de nada bueno, al llevar a cabo la inversión de  $P$  para obtener  $C$ , los problemas y las impropiedades se suceden a lo largo y ancho de la matriz. Este problema fue transmitido al ya mencionado Robert Dugan, desarrollador de OpenDSS, y si bien sugirió añadir cierta altura a los raíles para evitar la impropiedad, el autor no ha considerado que sea el enfoque adecuado debido al siguiente motivo: para que efectivamente los problemas matemáticos toquen a su fin, era necesario añadir tal altura a los raíles que el cómputo en general se veía demasiado alterado como para dar la solución por buena.

Así pues, el método adoptado por la herramienta, tras una larga discusión con diferentes académicos e investigadores, consiste en obviar los elementos a nivel de tierra en el cálculo de la capacidad ¿Cómo? Para ello se quitan las columnas y filas relativas a los mencionados conductores, que habitualmente serán los raíles. Una vez localizados y obviados dichos hilos, se podrá llevar a cabo un proceso absolutamente normal para determinar  $C$ . Una repercusión indeseada de este procedimiento es que debido a la idiosincrasia de OpenDSS no se podrá manejar la capacidad en su forma de matriz, pero como un escalar. Igualmente el lector podrá pensar que este procedimiento implica una pérdida en la precisión, y el autor no podrá más que darle la razón, pero igualmente hay que tener en cuenta dos hechos: ignorar la capacidad, como hacen muchos otros artículos, sería todavía una pérdida de información aún mayor; igualmente el orden de magnitud de la capacidad de la línea no es tal como para que las posibles pérdidas de información resulten relevantes en el flujo de potencias obtenido. Más adelante aparecerá otra medida que supone también alguna pérdida de precisión y cercanía a la realidad, pero para la que igualmente se enunciará un discurso similar al actual.

Así pues, en lugar de la expresión de arriba, que emplea  $H^*$  y  $D$  las cuales contienen los raíles como elementos, se empleará esta otra, que en su lugar contempla las ya citadas matrices  $H$  y  $D_C$ :

$$\text{Para } \forall i \text{ y } j : P_{A,ij} = P_{A,ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \log\left(\frac{H_{ij}}{D_{C,ij}}\right)$$

A partir de este momento el procedimiento a aplicar es absolutamente análogo al que se haría a mano o en cualquier otro software. Una vez obtenida  $P_A$  se debe proceder a la conocida eliminación de Kron para imponer la condición eléctrica de que  $U_R = 0V$ . Para ello, como es práctica habitual, se divide  $P_A$  en cuatro submatrices:  $P_{ff}$ ,  $P_{fg}$ ,  $P_{gf}$  y  $P_{gg}$ , conteniendo la primera sólo los elementos a tensión, la cuarta aquellos puestos a tierra, y la segunda y la tercera la intersección entre ambos grupos. Una vez definidas las submatrices aplicamos la expresión que impone los efectos de  $U_R = 0$  en la matriz:

$$P_A = \begin{bmatrix} P_{A,ff} & P_{A,fg} \\ P_{A,gf} & P_{A,gg} \end{bmatrix} m/F$$

$$P_B = P_{A,ff} - P_{A,fg} \cdot (P_{A,gg})^{-1} \cdot P_{A,gf}$$

Llegados a este punto, antes de realizar la inversión que nos dará como resultado la matriz  $C_D$ , se debe llevar a cabo la agrupación de conductores. La diferencia con la unión realizada



en el apartado anterior es que, obviamente, en esta ocasión no habrá que realizar la unión de los diferentes raíles. Las ecuaciones necesarias son análogas a las del caso de la resistencia y reactancia, por lo que no se exponen de nuevo.

$$P_B \longrightarrow \|Agrupación\ de\ Conductores\| \longrightarrow P_C$$

Ahora sí que se está en condiciones oportunas de llevar a cabo la inversión, que permitirá prescindir de variables relativas al potencial eléctrico para comenzar a trabajar con capacidades:

$$C_D = (P_C)^{-1} = \begin{bmatrix} C_{D,MM} & C_{D,MF} & C_{D,MR} & C_{D,MRa} \\ C_{D,FM} & C_{D,FF} & C_{D,FR} & C_{D,FRa} \\ C_{D,RM} & C_{D,RF} & C_{D,RR} & C_{D,RRa} \\ C_{D,RaM} & C_{D,RaF} & C_{D,RaR} & C_{D,RaRa} \end{bmatrix} F/m$$

El siguiente paso quizás sea el que más inexactitudes puede introducir en el método escogido. Y es que, para que la matriz fruto de la transformada de Fortescue tenga sentido, es decir, que sus elementos no diagonales sean nulos, ha de darse que la matriz objeto de la transformación sólo tenga dos valores diferentes en todos sus elementos: aquel que rellena la diagonal, y el que ocupa al resto de elementos no diagonales. Dichos valores no serán otra cosa que la media de los elementos diagonales y no diagonales, por separado. Así pues, para obtener el escalar final es necesario llevar a cabo este proceso.

¿Qué implicaciones tiene esto físicamente? Cuando se le aplican estas transformaciones a la matriz lo que se da a entender es que se está tratando el presente sistema como si fuera una línea *n-fásica* equilibrada que sufre una serie de transposiciones a lo largo de su recorrido. Obviamente esto es falso, pues ni la catenaria objeto de estudio es *n-fásica* equilibrada ni sufre transposición de sus cables alguna. Así pues hay que retomar el discurso ya enunciado al comienzos del apartado: este es un pequeño sacrificio de la precisión del resultado, pero igualmente se repite que se considera preferible obtener un valor significativo cercano a la realidad antes que no dar ninguno. En cualquier caso es digno de mención que siempre que se quiere obtener el parámetro escalar de cualquier línea *n-fásica* no equilibrada (lo cual no es del todo infrecuente), hay que llevar a cabo este proceso y sus suposiciones, por lo que en estas páginas no se está haciendo nada que no se haga con cierta regularidad.

Así pues, realizando las dos medias aritméticas oportunas, se obtiene la matriz  $C_E$ , la cual es perfectamente simétrica y que únicamente está compuesta por dos valores diferentes:  $C_{E,Diag}$  y  $C_{E,No\ Diag}$

$$C_{E,Diag} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{D,ii}}{n} \quad C_{E,No\ Diag} = \frac{\sum_{i=2}^n \left( \sum_{j=i}^n C_{D,ij} \right)}{\frac{n^2 - n}{2}}$$

$$C_E = \begin{bmatrix} C_{E,Diag} & C_{E,No\ Diag} & C_{E,No\ Diag} & C_{E,No\ Diag} \\ C_{E,No\ Diag} & C_{E,Diag} & C_{E,No\ Diag} & C_{E,No\ Diag} \\ C_{E,No\ Diag} & C_{E,No\ Diag} & C_{E,Diag} & C_{E,No\ Diag} \\ C_{E,No\ Diag} & C_{E,No\ Diag} & C_{E,No\ Diag} & C_{E,Diag} \end{bmatrix} F/m$$

Como penúltimo paso antes de la obtención del escalar definitivo, es menester aplicar la transformada de Fortescue. Ciertamente se tendrá la necesidad de referirse a la versión genérica de la propia matriz, no al caso particular de tercer orden, que sin duda alguna es el caso más famoso y empleado:

$$T_n^{-1} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & a & a^2 & \dots & a^{n-1} \\ 1 & a^2 & a^4 & \dots & a^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & a^{(n-1)} & a^{2(n-1)} & \dots & a^{(n-1)^2} \end{bmatrix}$$

*donde*  $a = 1/\angle(360/n)^\circ$

Así pues, el único paso que queda es escoger qué elemento de la matriz  $C_E$  es el que resulta útil para caracterizar la línea. Puede parecer trivial, pero este último escalón antes de obtener el resultado final produce mucha confusión en aquellos ingenieros que sólo han trabajado con sistemas trifásicos. Para saber qué elemento de la diagonal es fruto de nuestro interés hay que estar mínimamente familiarizado con los sistemas n-fásicos; al aplicar Fortescue a la matriz de capacidades, en la diagonal surgen tres "modos" diferentes: homopolar, directo e inverso. Para cierto número de fases hay más de un modo inverso, lo cual puede acarrear muchos problemas, pero afortunadamente el escalar que resulta útil para el proyecto es aquel relativo al modo directo, que siempre es sólo uno, y que se ubica en la segunda posición de la diagonal:

$$C_F = T^{-1} \cdot C_E \cdot T = \begin{bmatrix} C_o & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_d & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_i \end{bmatrix} ; \quad C = C_{F,22} = C_d \quad F/m$$

## 5 Implementación del Railway Simulation Tool

---

A lo largo del presente capítulo se tratará cómo se ha desarrollado oportunamente el proceso que de solución al problema planteado en el capítulo anterior, aplicando todos los conceptos del mismo. Para ello habrá que considerar dos estratos explicativos: el primero más global y abstracto referente al planteamiento general de la solución y su enfoque conceptual, y el segundo relativo a cómo dicha solución ha sido plasmada en la realidad empleando OpenDSS y Python. Mientras que aquella partes más interesante en lo físico y teórico es la primera, la segunda resulta más llamativa y compleja en lo que a los procesos computacionales, codificación y tratamiento de datos concierne.

Para describir de la manera más explicativa e intuitiva posible la presente implementación, se presenta en primer lugar el diagrama de flujo general y maestro al que obedece el programa, transmitiendo el proceder conceptual y global de la herramienta. Una vez repasado oportunamente el devenir del programa en un plano todavía abstracto, se tratará cómo se han implementado dichos procesos e ideas utilizando Python y OpenDSS.

### 5.1 Desarrollo Conceptual

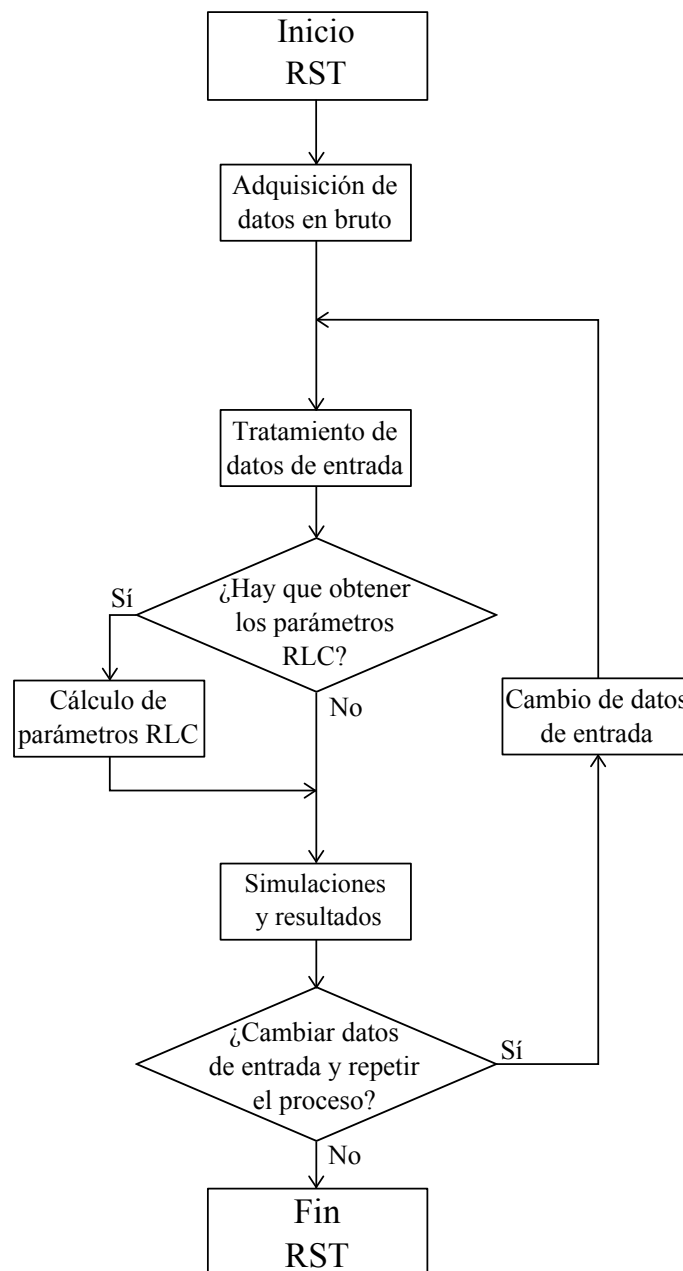
Como no podía ser de otra manera, el código no ha sido escrito desde cero sin tener previamente una idea bien reflexionada, y precisamente la filosofía de ese concepto todavía sin implementar es lo que pretende transmitir esta sección. Dicho proceder superior, junto a los fundamentos básicos revisados en el capítulo anterior, será el que dicte los pasos a seguir en el desarrollo posterior, por lo que la importancia del mismo es vital.

Bien cierto es que cada módulo del diagrama maestro se subdivide en la herramienta en otros tantos, interconectados entre sí y plasmados en su propio código, pero en un brindis a la simplicidad y al entendimiento, se considera oportuno reflejar en los próximos apartados diagramas el proceder general más que las diferentes particularidades. Ya se tratarán más adelante aquellos aspectos relativos a cómo se han implantado los procesos a continuación descritos.

El diagrama aquí adjunto busca ofrecer un procedimiento concreto, que haga posible la posterior aplicación de la solución planteada en el anterior capítulo. Así se creará un primer algoritmo concreto a seguir, que efectivamente atiende a los objetivos del proyecto: a

partir de unos datos de partida referentes a un proyecto ferroviario, obtener la información eléctrica preferida. A la hora de trazar el diagrama general ha primado la solidez, generalidad y lógica del mismo, pues difícilmente se podrá desarrollar posteriormente un código robusto y eficiente partiendo de unos conceptos que no estén bien definidos.

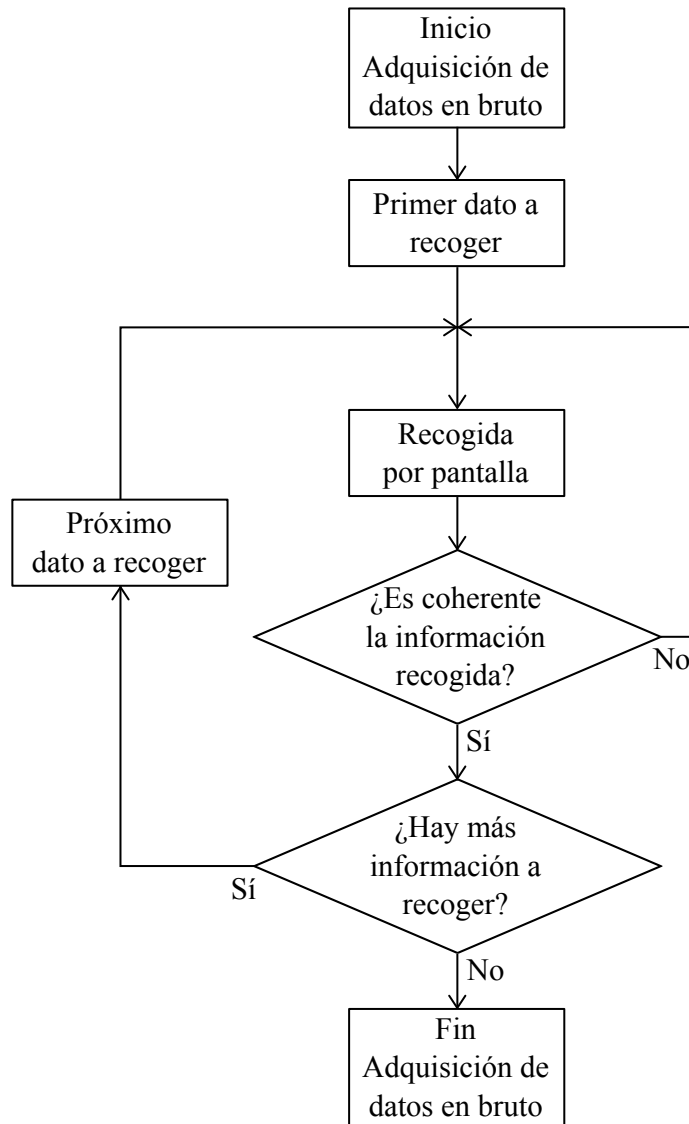
Así pues, se procede a realizar un repaso de los diferentes apartados del diagrama maestro, valorando y explicando de manera cualitativa el propósito de cada uno. El objetivo de esta sección no es otra que el lector asimile así la filosofía del proceder de la herramienta, así como entender (y compartir en la medida de lo posible) el enfoque dado por el autor.



**Figura 5.1** Diagrama de flujo maestro conceptual del RST con los principales apartados. Elaboración propia.

### 5.1.1 Adquisición de Datos en Bruto

El ánimo de este apartado no puede ser más sencillo e importante a la vez, pues como resulta obvio sin una interacción inicial con el usuario no se puede realizar trabajo alguno. Así pues, el objetivo de este primer módulo será el de **obtener de manera adecuada los datos necesarios**.



**Figura 5.2** Diagrama de flujo conceptual del módulo de adquisición de datos de entrada. Elaboración propia.

Resulta de gran importancia que los **datos introducidos sean correctos** en introducción, es decir, en su formato. Si bien el código **no podrá detectar errores numéricos** en cuanto al valor introducido y al que el usuario quería introducir (por ejemplo, distancia entre AT de *121* km en lugar de *12* km), sí que debe de poder **identificar errores de formato**, por ejemplo si se introduce una letra cuando sólo procede un número (por ejemplo,  $\varepsilon_{CC} = \text{hola}$ ). La relevancia de esta práctica reside en que si no se llevara a cabo la misma, más tarde se darían errores fatales en los diferentes módulos, cuando por ejemplo se

intentara hacer una operación matemática con un carácter.

Igualmente relevante será tener en cuenta que hay dos tipos de datos con los que lidiar: aquellos **esenciales**, y los **normales**. Se consideran parámetros esenciales los que determinan las líneas generales del código y **caracterizan la simulación**, como la potencia consumida en cada momento, la longitud de la vía o el tipo de configuración de alimentación empleada. Dichos parámetros no se pueden reemplazar con valores habituales estándar, ya que dependen absolutamente de cada proyecto y sus particularidades. Sin embargo, los datos normales sí que pueden ser sustituidos mediante **valores habituales** en caso de desconocimiento por parte del usuario, como son por ejemplo los parámetros eléctricos de la catenaria, las tensiones de cortocircuito de los transformadores, la distancia entre los IB,... Así pues, en caso de desconocimiento, se suplirán con valores típicos las variables de índole normal, pero no aquellos parámetros esenciales, de gran calado y valor absolutamente particular.

Finalmente, en este apartado también se deberá saber qué quiere obtener el usuario de la herramienta presente. Por defecto se obtendrá la evolución de la **potencia consumida** y el **perfil de tensiones** a lo largo de la simulación, pero adicionalmente se ofrece la posibilidad de calcular la **distribución de corrientes** y el perfil de tensiones en un cierto instante de la simulación, a indicar por el usuario.

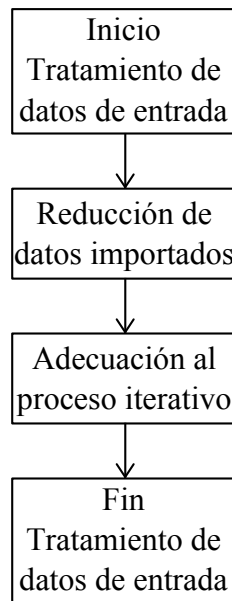
Dentro de la propia herramienta, esta labor la realiza el extenso módulo **RutinaPreguntas**. Así pues, una vez se haya obtenido de manera adecuada la información necesaria, se cierra este apartado y se procede al próximo según del diagrama general. Cabe destacar que si bien llegado este punto se ha conseguido recabar toda la información, todavía no se puede emplear para obtener los resultados, ya que no está preparada. Por ello, todavía será necesario un proceso intermedio de tratamiento y acondicionamiento para poder emplearla en la construcción de la vía.

### 5.1.2 Tratamiento de Datos de Entrada

Como podrá sospechar el lector, el formato de introducción de la información dista ampliamente de ser el adecuado a la hora de llevar a cabo la construcción del código. Así pues, para poder desarrollar adecuadamente las operaciones necesarias, es menester **procesar estos datos adquiridos en bruto** para obtener otros más elaborados y **adecuados en formato para ser empleados**, a través de un tratamiento de información previo al grueso del código.

De esta manera, el objetivo de este apartado será pasar de una gran cantidad de información, expresada en diferentes formatos y formas, a una **cantidad precisa y acotada** de datos, todos ellos indicados de la misma manera, y ordenados de tal forma que el empleo de los mismos sea tan inmediato como simple ¿Que por qué se pasa de una gran cantidad de información a otra menor? Principalmente debido a dos motivos: por un lado la información que posee el usuario tiene una resolución innecesariamente alta, y además ésta suele hacer referencia a toda la vía en lugar de solamente al tramo de interés.

Tras reducir la información facilitada, habrá que elaborarla para adaptarla a las necesidades del proceso iterativo y la construcción del circuito. Conceptualmente es muy simple este paso, pero computacionalmente sí que resulta más pesado, como se verá más adelante.



**Figura 5.3** Diagrama de flujo conceptual del apartado de tratamiento de datos de entrada. Elaboración propia.

Todo esto se lleva a cabo en la herramienta mediante los siguientes módulos: **Recogida-DatosCsv**, **DatosTramo**, **DatosSnap** y **TrenesDentro**. Finalizado este módulo se procede a obtener los parámetros eléctricos de la catenaria, en caso de que sea necesario.

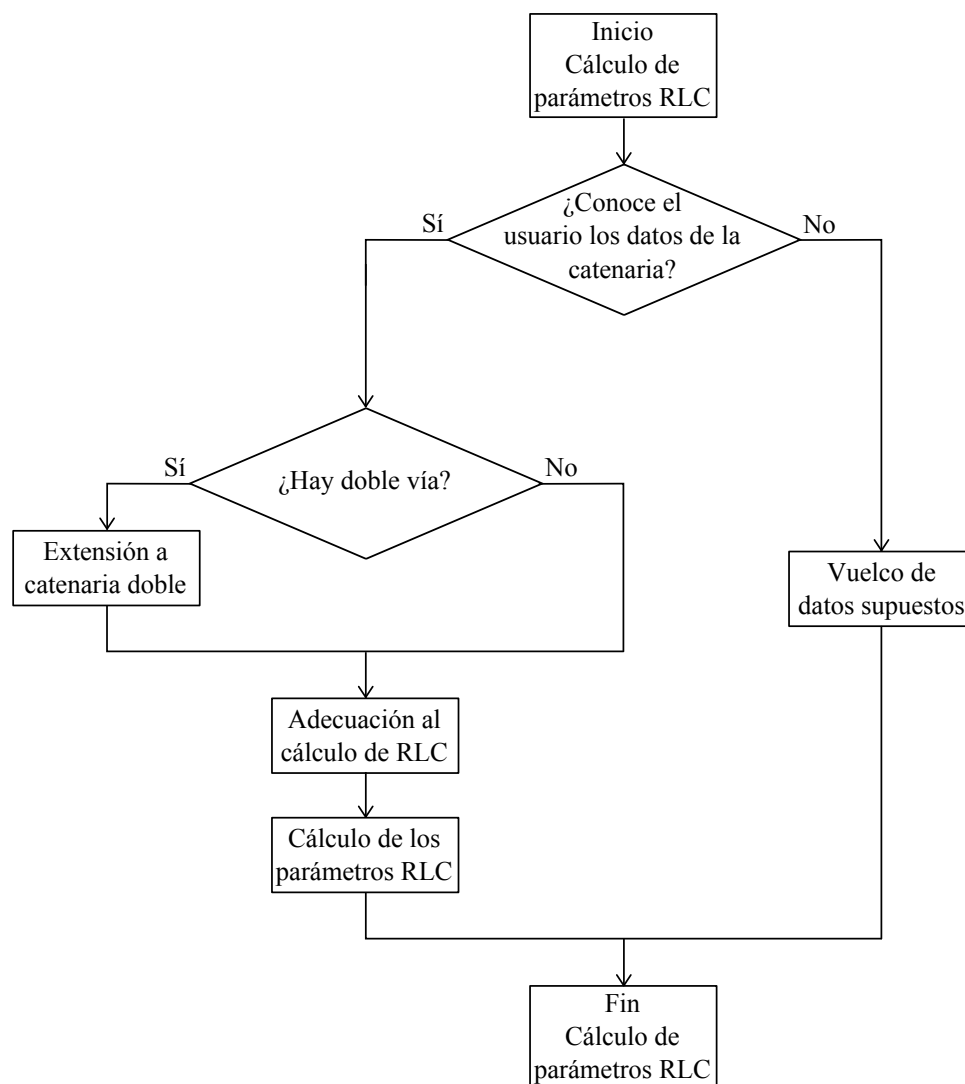
### 5.1.3 Cálculo de Parámetros RLC

El objetivo del presente módulo es **atribuir al código de los parámetros eléctricos** de la catenaria, en el caso en el que el usuario no disponga directamente de los mismos. Si se conoce el tipo de catenaria empleada, es decir la situación geométrica de cada cable, se puede llevar a cabo el proceso de cálculo oportuno. Solamente en dos situaciones posibles no se calcularán R, L y C: cuando el usuario desconozca totalmente la catenaria en cuestión, y si ya dispone directamente de los valores de los parámetros.

Para ello, la única información necesaria será aquella relativa a la posición geométrica y composición de los hilos (materiales, radio, temperatura de explotación,...). Con esos datos se puede llevar a cabo sin problemas el cálculo mostrado en capítulos anteriores.

Digno de mención es el caso del cálculo de parámetros en la presencia de **doble vía**. Habitualmente la información geométrica de los hilos se dispone en lo relativo a un solo lado de la catenaria, a una sola vía, por lo que normalmente el usuario no posee directamente de la ubicación de todos los conductores de las dos vías. Para ahorrar trabajo al usuario el propio módulo se encarga de "**reflejar**" la **catenaria** horizontalmente, para lo cual sólo es necesario saber la distancia entre los dos raíles centrales.

Se entiende por *adecuación al cálculo* a la declaración, construcción y manejo de multitud de variables auxiliares, que si bien carecen de significado e importancia teórica, resultan de grandísima utilidad para el correcto desarrollo del apartado en cuestión en el ámbito computacional. Este mismo paso se repite en otras secciones, y su razón de ser es siempre es la misma.



**Figura 5.4** Diagrama de flujo conceptual del apartado de cálculo de parámetros. Elaboración propia.

La presente labor es llevada a cabo dentro del código por los dos siguientes módulos: **ImpedanciaLinea**, **ConstruirSimetrico** y **RecogidaDatosTxt**. Cuando el usuario desconozca cualquier información de utilidad para la obtención de los parámetros, el módulo encargado de atribuir la información necesaria será **ParametrosDefecto**.

#### 5.1.4 Simulaciones y Resultados

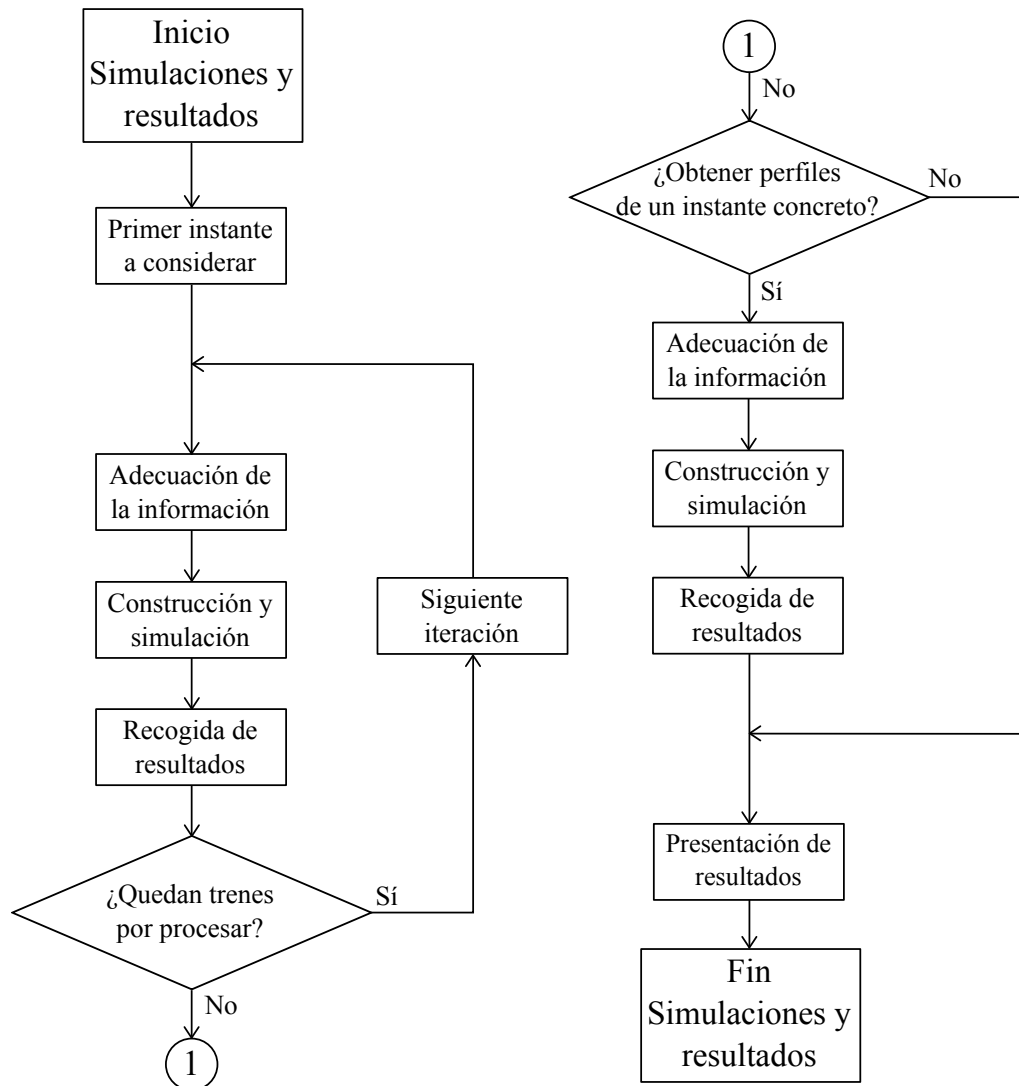
Este apartado constituye el cuerpo del algoritmo y su razón de ser. En la presente sección se combinan todos los datos tratados y obtenidos hasta ahora para **construir el modelo** de vía, **iterarlo** tantas veces como haga falta, y **presentar los resultados** al usuario.

En los procesos contenidos en este apartado **se emplea OpenDSS**, pues como ya sabe el lector es el programa escogido para construir el modelo eléctrico. Así pues, lo primero que procede es importar el programa y ponerlo a punto para empezar la construcción. Como ya fue explicado en el capítulo anterior, el tránsito de los trenes se simula llevando a cabo sendas iteraciones, representando cada una un estado determinado de la vía a lo largo del tiempo de compleción del trayecto planteado. De esta manera, se tendrá un bucle principal,



dentro del cual se construirá y simulará el modelo cada vez de manera diferente según la posición de los trenes a lo largo del trayecto.

Comenzando por el instante en el que **el primer tren entra en el tramo** considerado, y **hasta que salga el último convoy**, se repiten las mismas acciones: **se vuelca la información relativa al estado en cuestión, se construye el circuito** tal y como fue mencionado, **se simula** el mismo y se toman los datos pertinentes. Una vez se hayan completado todas las iteraciones se guardan los datos de consumo de cada estado, para su posterior representación.

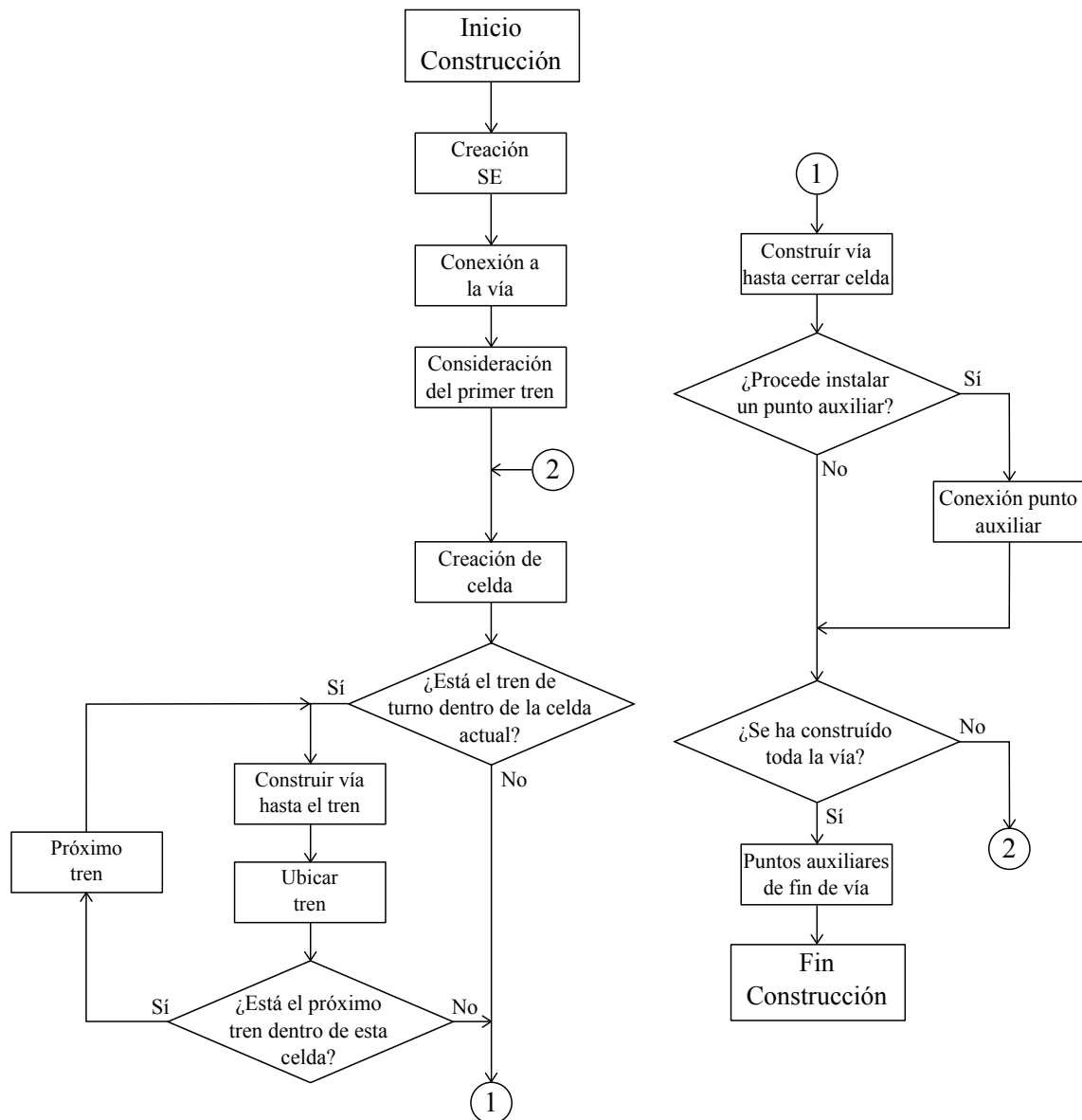


**Figura 5.5** Diagrama de flujo conceptual del apartado de simulaciones y resultados. Elaboración propia.

Cabe la opción de que el usuario quiera obtener la distribución de corrientes y el perfil de tensiones en un momento determinado de la simulación, llamado *snap*, por lo que en ese caso habrá que llevar a cabo una última simulación y construcción, tomando en esta ocasión los datos de corriente y tensión en lugar de potencia.

Realizadas todas las simulaciones oportunas, se procede a representar los valores obtenidos. Por un lado se mostrará la evolución del consumo a lo largo de la simulación,

remarcando especialmente el pico absoluto del mismo, e igualmente se generará un vídeo mostrando cómo varía el perfil de tensiones a lo largo de toda la línea. En lo respecto a la simulación *snap*, se representarán las corrientes circulantes por cada hilo equivalente, así como el perfil de tensiones para ese instance en concreto.



**Figura 5.6** Diagrama de flujo conceptual del subapartado de construcción. Elaboración propia.

Igualmente se incluye adjunto el diagrama que ejemplifica el **proceder simplificado en la construcción del circuito** en cada iteración. Si bien su enfoque es claro y simple, su desarrollo en OpenDSS como COM no lo será, ya que los condicionantes encadenados requieren de muchas variables auxiliares interconectadas y un amplio rango de casuística.

Obviamente en el diagrama adjunto se dejan a un lado apartados internos y procesos intermedios de mínimo tamaño, cuya existencia se debe únicamente a razones computacionales, y que debido a que su relevancia en el proceder general del código es mínima

no figuran en los mencionados diagramas. En cualquier caso, igualmente se incluirán en la revisión de la implementación en Python.

Todos los procesos aquí descritos de manera conceptual se desarrollan extensivamente a lo largo de los módulos **CircuitoConsumo**, **Video**, **CircuitoOpenDSS** y **CircuitoSnap**. Así pues, tras finalizar el cuerpo principal del código, se procedería a ofrecer al usuario cambiar los parámetros previamente introducidos.

### 5.1.5 Cambio de Datos de Entrada

Este último módulo tiene por objetivo **simplificar la repetición de la simulación**, ofreciendo así en lugar de reiniciar todo el código, **cambiar solamente los parámetros preferidos**. Esta situación es bien habitual, pues uno de los potenciales usos de la presente herramienta es poder comparar de manera oportuna cuantitativamente la conveniencia o no de la elección de cierto valor para cualquiera de los parámetros en juego.

La simplicidad del presente apartado es similar a aquella del primero de todos, la rutina de adquisición de datos, pues bien el desarrollo es similar. Basta con ofrecerle al usuario una ristra de parámetros a cambiar, para que el mismo escoja y cambie, sufriendo así un proceso absolutamente análogo a aquel de la adquisición de datos. Una vez cambiados los datos oportunos se procede a repetir directamente las simulaciones en cuestión.

Así pues, de esta manera se concluiría el procedimiento general adoptado, finalizaría el funcionamiento de la herramienta, y se alcanzaría así el objetivo del presente trabajo.

## 5.2 RST: Adquisición y Tratamiento de Datos

Se procede ahora a describir cómo se han implementado en Python todos los conceptos y procesos previos, sin llegar a incidir en los comandos y códigos concretos empleados. En primer lugar se tratarán aquellos módulos que participan primero en la herramienta, y que íntegramente han sido desarrollados con Python. En secciones posteriores se tratará la parte respectiva a OpenDSS y a la obtención y presentación de datos, en las que sí que se profundizará en mayor grado, incluyendo los códigos empleados.

De esta manera, en esta sección se centrará el discurso en todos los pasos necesarios para obtener, procesar y adecuar la información para más tarde ser explotada por OpenDSS.

### 5.2.1 Adquisición de Datos

Tal y como fue indicado en apartados anteriores, el módulo encargado de esta labor es **RutinaPreguntas**, que tras dar una breve bienvenida y mostrarle una introducción al usuario, comienza a pedirle información al mismo. La cantidad y el tipo de datos son variables, ya que ello dependerá incontestablemente de la configuración empleada y el proyecto como tal.

Los primeros datos en ser preguntados son aquellos comunes y básicos, de los cuales más tarde dependerá el resto de la información. De esta manera, se recoge el tipo de configuración empleada en la variable **F**, la frecuencia de explotación en **f**, si el trayecto es de doble vía en la variable **vuelta**, ruta al archivo .csv con los datos del trayecto de ida, y aquel con los de vuelta si procede, los tiempos de salida de los trenes de ida en **salidas<sub>i</sub>**, y los de vuelta en **salidas<sub>v</sub>** según procedan, kilómetros de inicio y fin del tramo a dimensionar en **D1** y **D2**,... así como muchas variables auxiliares más, de menor importancia. A

todos aquellos parámetros "normales" cuyo valor desconozca el usuario, se les asignará una cantidad por defecto almacenada en el código.

Igualmente se ha de preguntarle al usuario qué quiere obtener de la herramienta. Tal y como está planteado el código, la principal información a mostrarle al usuario es la evolución del consumo a lo largo de los trayectos considerados, pero igualmente se ofrece la posibilidad de obtener más información. El usuario deberá especificar si quiere que se genere un vídeo que muestre la evolución del perfil de tensiones a lo largo de toda la simulación, cuya mayor pega es un aumento sensible en el tiempo de computación del código. También se considera la oportunidad de indicar un instante determinado del cual el usuario quiera conocer la distribución de corrientes por cada hilo, así como el perfil de tensiones en ese momento. La elección del usuario determinará que haya que simularse el modelo iteradamente, o bien de manera iterada y después puntual.

Una vez el código sabe cómo se explota la vía y cómo se quiere simular, se procede a recoger variables de impacto únicamente eléctrico. Dichos parámetros son aquellos de impedancia de los transformadores y la caracterización RLC de la catenaria. Así pues, el usuario podrá transmitir los parámetros eléctricos de la línea de diferentes maneras según la manera en la que los tenga expresados: a través de matrices (caso preferido), de escalares por unidad de longitud, indicando la ruta de un archivo .txt con la información geométrica, o simplemente autorizando al programa a asignar valores por defecto.

La implementación de esta rutina de preguntas es bastante monótona y plana, basta con considerar una gran casuística para imprimir y recoger datos por pantalla. Empleando las funciones *if* y *for* se consiguen recabar toda la información bruta de manera medianamente simple. Una vez haya acabado toda interacción con el usuario, se mostrará un mensaje rogando paciencia y se procederá a imprimir los resultados según vayan siendo obtenidos por el código. Mientras el usuario espera, el código procede a realizar el tratamiento de datos.

En los párrafos previos de descripción de la recogida de información se ha hecho referencia a dos archivos: un .csv continente de la información sobre el trayecto propiamente, y otro con los datos geométricos de la catenaria en empleo. Concretamente, el primer archivo posee una gran cantidad de medidas de, esencialmente, consumo, posición y tiempo de viaje de un hipotético tren en transcurso a lo largo de la vía, que al fin y al cabo es lo que caracteriza al tramo en cuestión. El segundo es una mera recopilación de los datos necesarios para llevar a cabo el cálculo de los parámetros RLC de la catenaria. Las razones por las cuales se ha empleado este canal para transmitir la información son las siguientes: el archivo .csv es el medio más empleado en el sector a la hora de contener la información relativa a la caracterización de la vía, así que es el estado más probable en el que el usuario posee dichos datos; por otra parte el archivo .txt se ha escogido para evitar que el usuario deba de introducir por pantalla una gran cantidad de información, lo cual es tan incómodo como propicio a producir errores. De esta manera, este módulo se responsabilizará únicamente de obtener las rutas a ambos archivos, encargándose de la extracción de la información contenida (considerado tratamiento de datos, más que adquisición) futuros apartados.

### **5.2.2 Tratamiento de Datos**

Inmediatamente tras finalizar RutinaPreguntas, el código adapta toda la información necesaria, tal y como fue explicado en la sección anterior. Lo primero será decidir si llevar

a cabo o no el cálculo de los parámetros eléctricos en **ImpedanciaLinea** y la generación de la segunda vía con **ConstruirSimetrico**.

En caso de que fuera necesario llevar a cabo la obtención de los mismos, el código primero debe recoger la información necesaria para ello. En este caso será necesario importar los datos contenidos en el .txt, que será relleno en texto plano según un modelo facilitado, para posteriormente ser leído a través del módulo **RecogidaDatosTxt**, que línea a línea **extrae toda la información necesaria**. Si no se siguiera la estructura modelo facilitado al usuario, se producirían múltiples errores o resultados carentes de sentido.

```
#MODELO DE INTRODUCCION DE DATOS. RESPETE EL ORDEN DADO EN CADA DETALLE.
#Datos de entrada. Datos geometricos solo relativos a UNA via.

#Temperatura
T
#Hilos en Total
n
#Fases: 1 (+25kv) o 2 (+25kv y -25kv).
p
#¿Rail(1) o Retorno+Rail(2)?
Tc
#Hilos a +25kv (Como mínimo 2: mensajero y catenaria. El resto se consideraran multiplex de la catenaria)
a
#Hilos a -25kv (Si previamente fue considerada la fase a -25kv)
b
Cables de Retorno (Si se introdujo previamente '2')
c
Railes (Obligatoriamente 2: exterior e interior. Railes auxiliares o de servicio se desprecian)
2
#Coordenada X Hilo 1 a +25kv (En cm, tomando como origen de coordenadas cualquier punto del suelo)
X
#Coordenada Y Hilo 1 a +25kv
Y
.
.
.
```

**Figura 5.7** Modelo facilitado del archivo .txt a rellenar por el usuario. Captura propia.

Tras disponer de los datos geométricos y físicos necesarios, la herramienta recrea exactamente todos los pasos seguidos en el cálculo explicado en previos apartados, para así obtener las matrices ***RI***, ***XI*** y el escalar ***CI***. Si por el contrario el usuario no supiera nada respecto a la catenaria, el código simplemente volcaría los **datos RLC almacenados** correspondientes al escenario pertinente, a través del módulo **ParametrosDefecto**, que son aquellos relativos a un mástil habitualmente empleado.

La situación más favorable en términos de computación sería aquella en la que el propio usuario ha facilitado los parámetros RLC, pues en ese caso no habrá que ejecutar módulo adicional alguno.

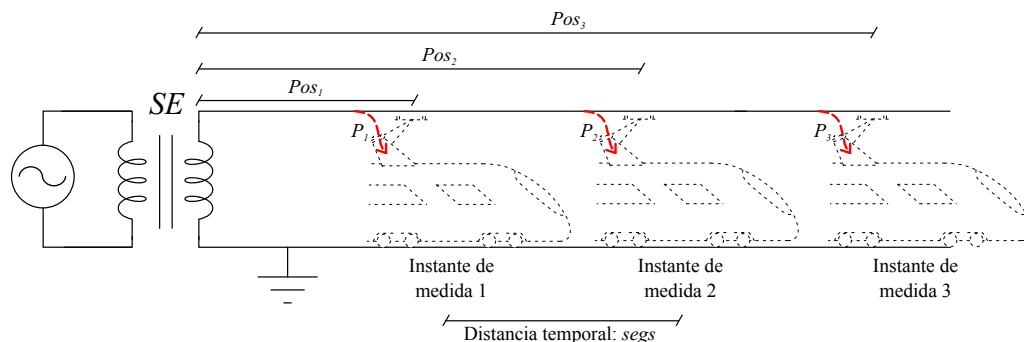
Una vez solventado todo lo relativo a los parámetros eléctricos, el código procede a encargarse del tratamiento y acondicionamiento de datos como tal. Tal y como se mencionó en el apartado de adquisición de datos, la información relativa al consumo del tren a lo largo del trayecto queda contenida en un archivo .csv, debido a que es la manera habitual empleada por el sector. Así pues, antes de dar cualquier otro paso, habrá que extraer esa información, importándola al igual que se hizo con el documento .txt. En el mencionado archivo se indican las medidas de posición, tiempo y consumo cada muy pocos metros, por lo que al fin y al cabo consiste en una discretización (de muy alta resolución) de la curva de potencia asociada al trayecto de un único tren.

La estructura del .csv considerada para leer el archivo es aquella empleada típicamente en el sector, por lo que no debería surgir problema de incompatibilidades ninguno. En el módulo **RecogidaDatosCsv** se emplean los paquetes oportunos de lectura para obtener los **vectores de posición, tiempo transcurrido y consumo**, que recuerde inicialmente contienen información relativa a todo el trayecto en su completitud.

Ciudad A - Ciudad B					
Vmax=300 km/h					
Distancia al origen (km)	t (mm:ss)	v (km/h)	Potencia (kW)	Potencia devuelta (kW)	
0	0:00	0	0	0	
0.01	0:01	8	8000	0	
0.02	0:01	11	8000	0	
0.03	0:02	13	8000	0	
0.04	0:04	15	8000	0	
0.05	0:05	17	8000	0	
0.06	0:06	18	8000	0	
0.07	0:07	20	8000	0	

**Figura 5.8** Estructura típica del archivo .csv. Captura propia.

La cantidad de datos a importar desde el .csv dependerá de la resolución que se le quiera dar a la simulación, es decir, al espacio temporal entre los diferentes estados considerados de la vía para recrear el movimiento. Dicha resolución vendrá indicada por la variable interna *segs*. Así pues, de todos los datos contenidos en el .csv, se importarán aquellos que estén distanciados *segs* segundos o más entre sí. La elección de dicho valor no ha sido fácil, para ello se han realizado muchas ejecuciones tomando diferentes valores, para llegar así a un valor de tiempo que ofrezca una buena resolución y una duración de computación aceptable, el cual ha terminado valiendo 2 s.



**Figura 5.9** Ejemplificación de la información que nos da el archivo .csv. Elaboración propia.

El módulo **DatosTramo** se encarga de **acotar dichos vectores**, utilizando para ello las variables *D1* y *D2*, arrojando como resultado *Posi*, *Posv*, *ti*, *tv*, *Pi* y *Pv*, en referencia a los trayectos de ida y vuelta respectivamente. Para ello se ha implementado un bucle que recorre el vector de distancias de inicio a fin, guardando las posiciones correspondientes a aquellos valores iguales a *D1* y *D2*. Así pues, sabiendo ambas posiciones, el código podrá desechar todos aquellos elementos que se salgan del rango comprendido entre ambas. Igualmente en este módulo se realiza la conversión de datos temporales, pasando de la base sexagesimal en horas, minutos y segundos, a la decimal.

En el caso de doble vía, si en la simulación planteada por el usuario no circularan trenes en alguno de los dos sentidos, el programa asignaría justo antes de DatosTramo valores aleatorios a las variables relativas a la vía vacía (*Posx*, *tx*, *Px* y *salidasx*), para evitar errores fatales internos.

Así pues, llegados a este punto, la herramienta dispone de los datos de: distancia a la SE,

tiempo transcurrido, y potencia consumida por un hipotético tren en circulación a lo largo de la vía, con una distancia temporal entre medidas de *segs* segundos. Que decir tiene, que si bien en la práctica la resolución del .csv es alta, igualmente se dan zonas de cientos y miles de metros sin datos algunos. Este problema no es sorteable por la herramienta, y ello produce el efecto de que el tren se parara súbitamente aunque continuara consumiendo, para más tarde teletransportarse una gran distancia hacia adelante.

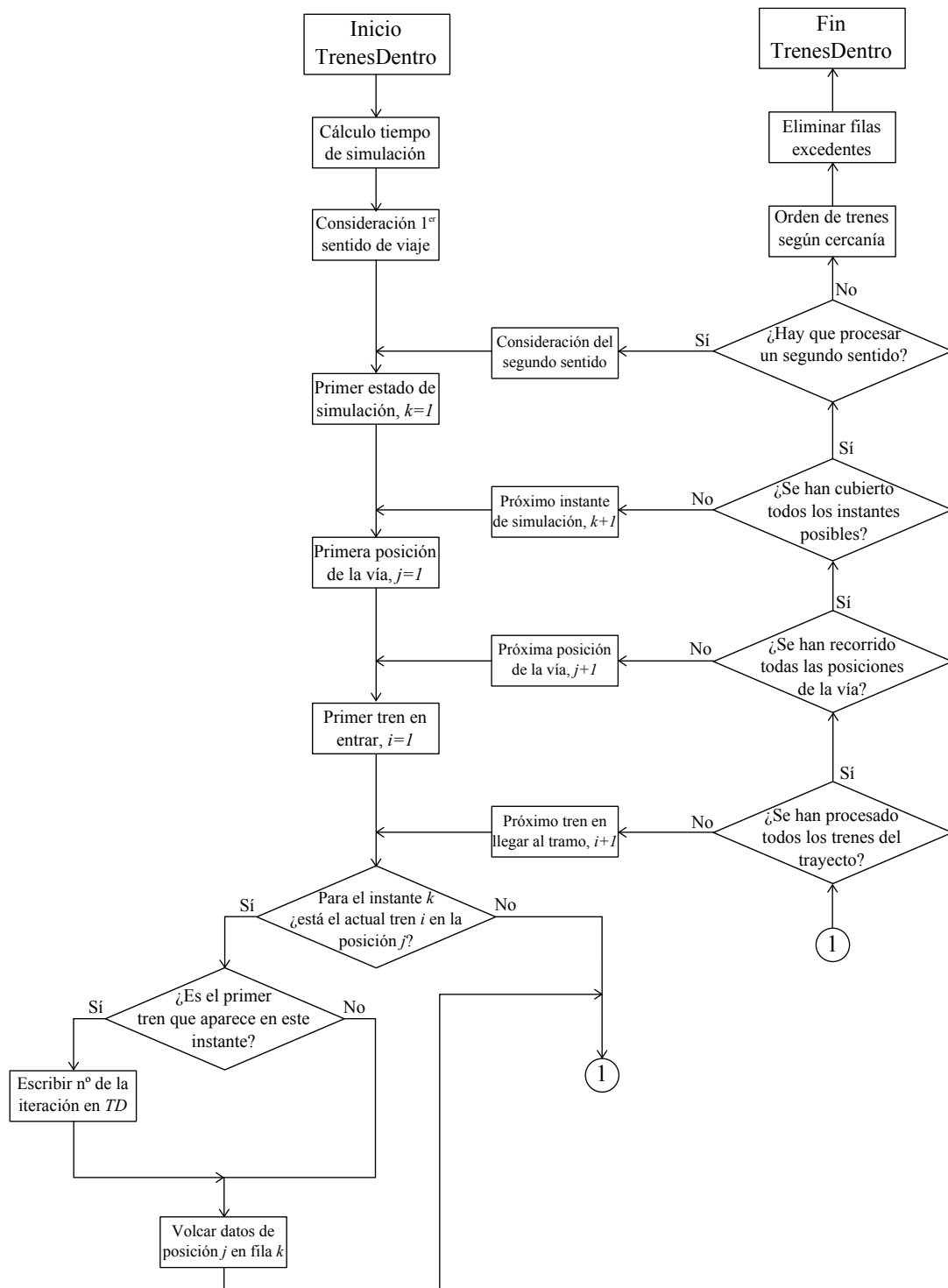
La terna de variables de la que dispone el código llegado a este punto sufre inmediatamente un gran proceso de tratamiento de datos en el módulo **TrenesDentro**. Sin duda alguna este es el apartado más complejo de todos en lo que a computación respecta. En él se confecciona la matriz **TD**.

Dicha matriz está pensada para que durante las iteraciones que recrean el movimiento se pueda **acceder a la información** de la manera más **simple y eficiente** posible. Así pues, para diseñar **TD**, se debe de plantear la siguiente pregunta ¿Qué es necesario saber en cada iteración para recrear el estado concreto de la vía? La respuesta es dos tipos de datos: aquellos constantes que no varían con cada iteración, y que hacen referencia a cómo se explota la vía (longitud del tramo, configuración empleada, parámetros RLC,..) y aquellos otros datos que sí que varían entre instantes, es decir, los **relativos a los convoyes en tránsito** ¿Y qué caracteriza a cada tren en la vía? Su posición respecto a la SE y la potencia que consume; aunque modelísticamente el tiempo transcurrido no sea relevante, se necesitará a la hora de confeccionar **TD**, por lo que se importa igualmente del archivo .csv. Así pues, en cada iteración, en cada instante de la vía, el modelo exige saber los datos de posición y consumo de cada tren. Mientras que la **potencia intercambiada** se indica con un simple escalar positivo o negativo, la posición requiere de dos variables: la propia **distancia hasta la SE**, y el **sentido de avance** del tren. Es necesario conocer la dirección de movimiento del tren, pues a la hora de construir el modelo es vital saber si hay que ubicar un tren en una vía o en otra, lo cual altera contundentemente los resultados obtenidos. Como no podía ser de otra manera, todos esos datos tendrán que ser conocidos para cada tren dentro del tramo.

De esta manera, diseñamos la matriz **TD** con la siguiente estructura: tendrá **tantas filas como iteraciones haya**, con una primera columna indicando el **número de la iteración**, y paquetes de **tres columnas por tren indicando distancia a la SE, potencia consumida, y sentido**. Así pues, el número de columnas que tendrá **TD** será igual a  $1 + 3 \cdot n$ , siendo  $n$  el número máximo de trenes simultáneos a lo largo de toda la simulación. Para facilitar el acceso a la matriz, los trenes tendrán que ser ubicados de manera ordenada en cada fila, apareciendo primero aquellos más cercanos a la SE. Igualmente ha de darse que **todas aquellas columnas libres tengan por valor -1**, para así poder identificar fácilmente cuándo se debe parar la lectura de datos, aunque dicha labor se realiza independientemente una vez rellena la matriz **TD**.

Así pues, para construir **TD**, en primer lugar hay que estimar la cantidad de iteraciones necesarias para simular enteramente el recorrido completo del trayecto, para así saber cuántas filas tendrá. Ello dependerá del tiempo que tarda en abandonar el tramo el último tren de todos, que puede ser o bien el último de ida o de venida. Para obtener el tiempo total sumamos dos cantidades diferentes: lo que tarda en llegar al tramo, y lo que tarda en recorrerlo. Una vez obtenido el tiempo total de simulación, éste se divide entre la resolución adoptada, recuerde indicada por la variable *segs*, obteniendo así el parámetro *npts*. Por cautela se le establecerá un coeficiente de seguridad, para evitar así posibles errores

dimensionales. A la hora de establecer la cantidad de columnas de las que gozará *TD* se tomará igualmente un caso conservador, dimensionando a la matriz con  $1 + 3 \cdot n_{max}$  columnas, que equivale a suponer que en cierto momento todos los trenes considerados estarán dentro del tramo en cuestión.



**Figura 5.10** Diagrama de flujo simplificado del módulo TrenesDentro. Elaboración propia.

Así pues, la primera fila de *TD* contendrá la información relativa al estado de la vía



justo cuando el primer tren penetra en el tramo. La siguiente fila describirá la situación de la vía pasados *segs* segundos. Así pues, al recorrer la matriz *TD* se viaja a través de un eje temporal ficticio, dando pasos de *segs* segundos, hasta cubrir todo el tiempo necesario para recorrer completamente el trayecto. De esta manera se consigue recrear el paso del tiempo, a base de los ya mencionados estados correlativos de la vía.

El proceso a describir a continuación se repetirá para cada uno de los *npts* instantes a lo largo del tiempo necesario para recorrer todo el trayecto. **Para cada repetición *i* de la simulación** (que implicará un transcurso temporal de  $1 \cdot segs$  desde que entró el primer tren), **se recorre todo el vector *Pos***, viajando así de manera ficticia a lo largo del tramo. Así pues, para cada posición *j* de la vía se comprueba si hay algún tren *k* que debiera estar ahí ubicado. En términos temporales esto se traduce en comprobar **si el tiempo de simulación transcurrido hasta el instante *i* es igual o mayor que lo que tarda el tren *k* en llegar al tramo más el tiempo que transcurre hasta ubicarse en la posición *j***. Cuando se da una coincidencia se vuelcan los datos de potencia consumida, distancia a la SE y sentido pertinente ( $P[j]$ ,  $Pos[j]$  y 0 o 1) dentro de la fila *i* de la matriz *TD*. Una vez un tren ha sido ubicado en la vía, será ignorado en las comprobaciones de las siguientes posiciones de la vía. Cuando se hayan recorrido todos los puntos de la vía y se hayan comprobado todos los trenes para cada una de ellas, se pasa a la próxima fila de *TD*, es decir al siguiente instante de la simulación, que implica un avance temporal de  $segs \cdot i$  segundos.

Así pues, si al terminar de recorrer el tramo han habido trenes que no han sido ubicados, esto sólo puede ser debido a que o bien no han llegado al tramo (la simulación tendrá que avanzar más todavía) o que ya lo han abandonado. Si debido al sobredimensionamiento de seguridad se han quedado filas vacías (que empiezan por -1), éstas se borrarán ajustando el tamaño de *TD* al mínimo necesario.

Se muestra como ejemplo la *TD* correspondiente a un trayecto de 30 km que requiere *j* iteraciones para ser completado. En primer lugar entra un tren de ida consumiendo 8 MW, para instantes después penetrar en el tramo por el extremo opuesto un segundo convoy, de vuelta consumiendo 6'5 MW. En este caso en particular se da que en cierto momento absolutamente todos los trenes considerados por el usuario se ubican dentro del tramo, lo cual ocurre en la iteración *i*-ésima al penetrar en la vía un tren de vuelta consumiendo 8 MW. Finalmente, la matriz acaba en la fila *j*-ésima, cuando el último tren, avanzando hacia la SE y consumiendo 8 MW, sale del tramo considerado.

$$TD = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 8000 & 0 & -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ 2 & 0.01 & 8000 & 0 & -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ 3 & 0.02 & 8000 & 0 & 30 & 6500 & 1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ 4 & 0.03 & 8000 & 0 & 29.99 & 6500 & 1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ 5 & 0.04 & 8000 & 0 & 29.98 & 6500 & 1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i & 12 & 7800 & 0 & 15 & 6300 & 0 & \dots & 30 & 8000 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ j-1 & 0.01 & 8000 & 1 & -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 \\ j & 0 & 8000 & 1 & -1 & -1 & -1 & \dots & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Ahora que se dispone de la matriz *TD* oportunamente construída y confeccionada, re-sumiendo en un solo elemento toda la información necesaria para recrear el movimiento

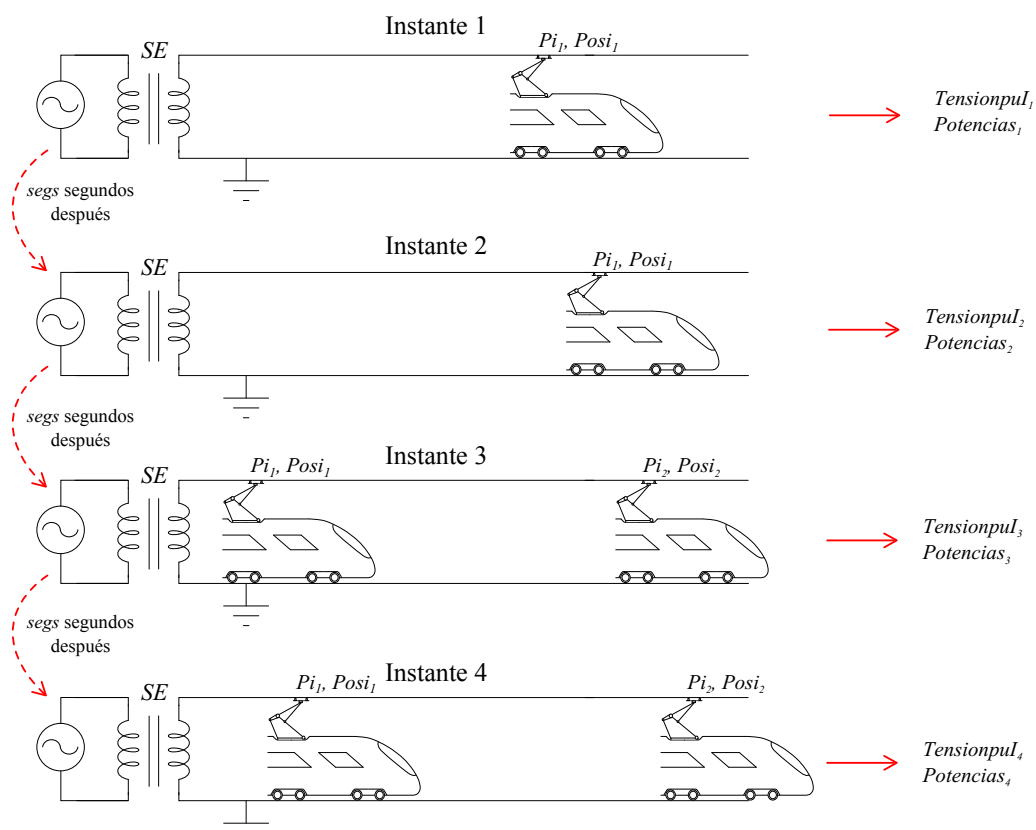
de trenes, se está en condiciones de comenzar el bucle para simular el tránsito de trenes.

Aún así, todavía queda un paso de tratamiento de datos por dar, y es aquel que toma lugar en **DatosSnap**. Su ánimo es el mismo que el de TrenesDentro, pero en lugar de producir una matriz con información relativa a todo un espacio temporal, DatosSnap ha de simplemente escoger la información relativa al *snap* elegido por el usuario. Recuerde, cabe la posibilidad de que además de las simulación iterada, se lleve a cabo una adicional, que muestre el estado de la vía para un instante determinado por el usuario.

De esta manera, el proceder de DatosSnap será similar al de TrenesDentro, con la diferencia de que una vez revisadas todas las posiciones posibles de la vía, no se considera ningún otro instante posterior, como sí que sucedía en TrenesDentro. Así pues, en el caso de que el usuario decida ejecutar DatosSnap, este creará las variables ***Ds***, ***Ps*** y ***sentidos***, continentes de toda la información necesaria para ubicar a los trenes en la vía.

### 5.2.3 Gestión de Simulaciones y Presentación de Resultados

Llegados a este punto, el tratamiento de información ha llegado a su fin, y lo único que queda es la gestión de la construcción del circuito, así como la presentación de la información recabada al simular los mismos. Ello se realiza a través de dos módulos que se encargados transmitir la información oportuna a **CircuitoOpenDSS**, que es el responsable propiamente de la construcción del modelo en OpenDSS.



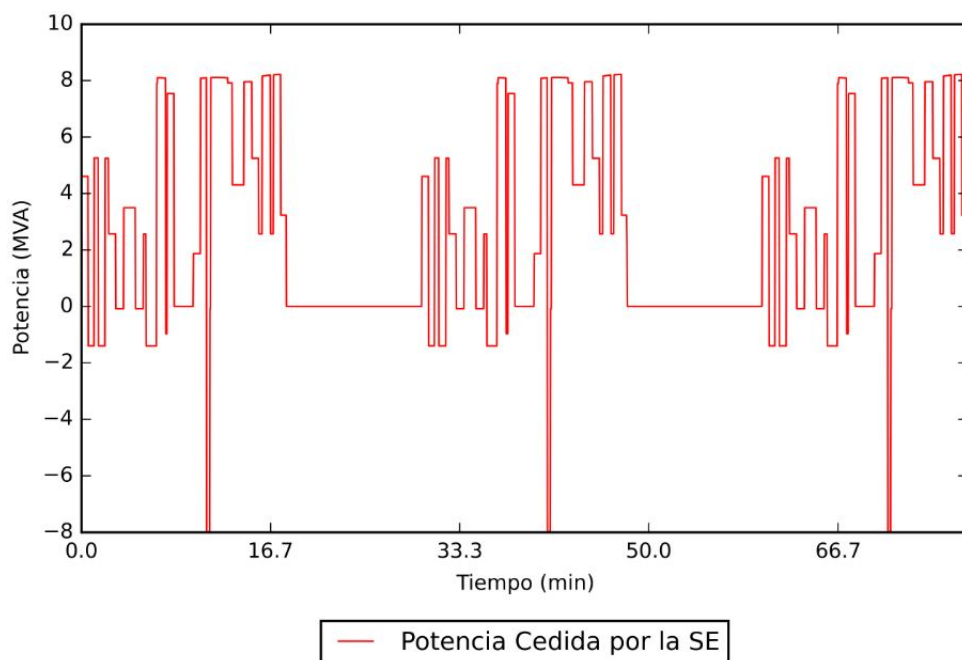
**Figura 5.11** Ejemplificación del proceso seguido a lo largo de las iteraciones en un trayecto de única vía, así como las variables en juego. Elaboración propia.

Así pues, una vez la matriz  $TD$  está lista, se detona el módulo **CircuitoConsumo**, encargado de la gestión, construcción y simulación de la vía correspondiente a los trenes en movimiento. Principalmente, la información que necesita el módulo para llevar a cabo adecuadamente su cometido es la siguiente: parámetros eléctricos de la catenaria, matriz  $TD$  y los datos relativos a la explotación de la vía.

La transmisión de información a CircuitoOpenDSS se hace mediante las tres siguientes variables:  $D$ ,  $P$  y *sentidos*.  $D$  contendrá los datos de distancia a la SE ubicados en la primera columna de las tres relativas a cada tren de  $TD$ ,  $P$  indicará el consumo para ese preciso instante, mientras que *sentidos* contendrá la dirección de avance de cada convoy, indicada en la tercera columna correspondiente a cada tren. Así pues, para caracterizar el  $j$ -ésimo tren más cercano a la SE, se hará uso de  $D[j]$ ,  $P[j]$  y *sentidos*[ $j$ ]. Estas variables serán oportunamente empeladas por CircuitoOpenDSS en sus procesos internos.

Así pues, al ejecutarse CircuitoConsumo, se inicia un bucle de tantas iteraciones como filas tenga  $TD$ , el cual a cada pasada toma la información del estado pertinente y la vuelca en el módulo de construcción CircuitoOpenDSS, realizando un breve acondicionamiento previo. De esta manera, en cada iteración se construye el circuito, se simula, se extraen los resultados oportunos, y se repite el proceso con la información del siguiente estado.

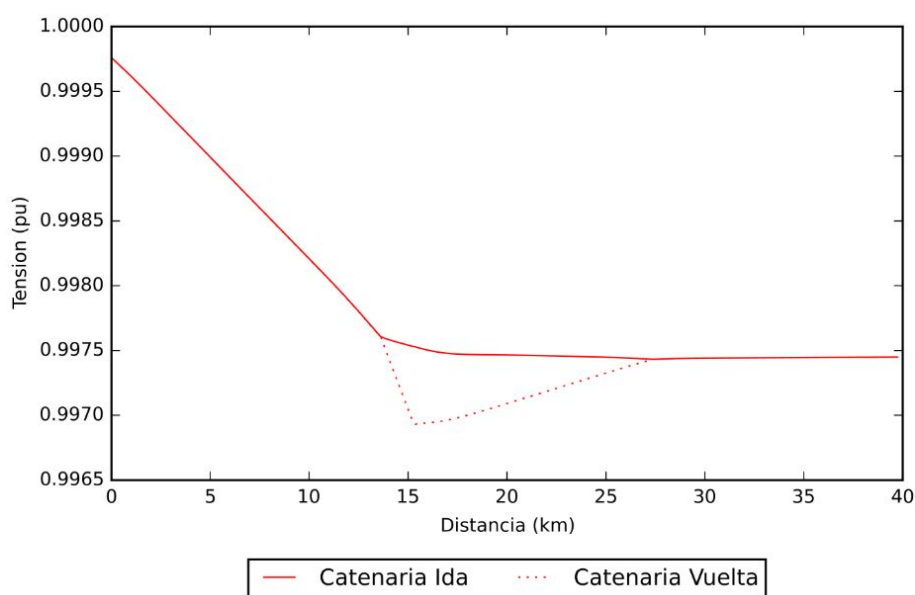
Una vez simulado el circuito, se vuelca la información obtenida en las variables *TensionpuI*, *TensionpuV*, *Potencias* y *Energia*, que contendrán los perfiles de tensión de la vía de ida, de la de vuelta, la potencia cedida por la SE a cada instante y la energía inyectada total respectivamente. Todos los perfiles de tensión más tarde se aglutinarán en un solo vídeo, que mostrará la evolución de la tensión en la catenaria a lo largo de toda la simulación, de lo cual se encarga el módulo *Video* mediante la herramienta FFMPEG. Por otra parte, una vez ha sido acabado el proceso iterativo, se unen los datos de consumo, para así representar oportunamente la curva de potencia que representa el tramo ferroviario en cuestión.



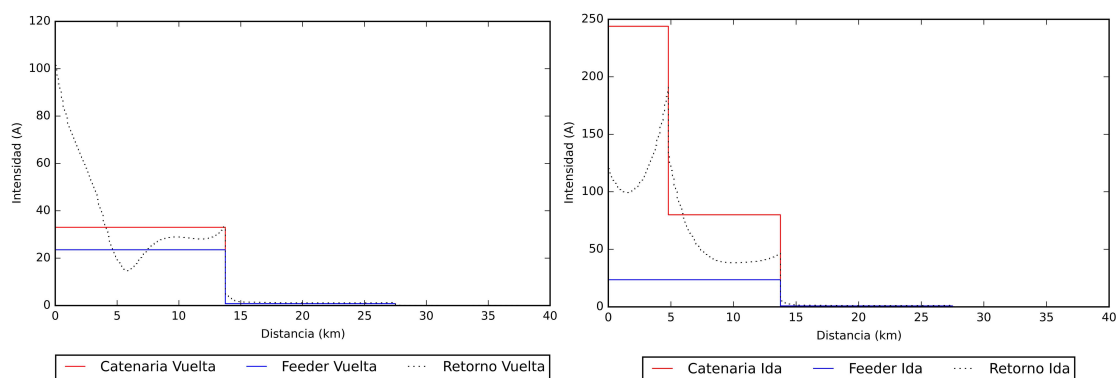
**Figura 5.12** Ejemplo de curva de potencia creada por RST. Elaboración propia.

La gestión de la simulación instantánea viene realizada por el módulo CircuitoSnap. En lugar de requerir la matriz  $TD$ , éste sólo necesita la información contenida en las ya mencionadas variables  $Ds$ ,  $Ps$  y  $sentidos$ , facilitadas por DatosSnap.

Si bien la extracción de los resultados es bastante simple en la simulación iterativa, en este caso no será así. La razón reside en que si bien antes bastaba con conocer la cesión de potencia de un único bus y el perfil de tensiones (fácilmente exportable desde OpenDSS), en esta ocasión es necesario recorrer todos los buses del modelo (alrededor de 26000 para una vía de 40 km con celdas de 1'5 km) y sus conexiones internas, a fin de conocer qué intensidad circula por cada hilo. El proceso es bien largo, requiere de comandos específicos de OpenDSS como COM (algunos reflejados en [14]) y contiene una gran casuística, pero se considera oportuno no entrar en más detalles debido al poco interés que despierta para el ánimo del presente documento.



**Figura 5.13** Ejemplo del perfil de tensiones creado por *RST*. Elaboración propia.



**Figura 5.14** Ejemplo de la distribución de corrientes creada por *RST*. Elaboración propia.

Así pues, una vez que se disponen de todos los resultados, se emplean los comandos *plot* para mostrarle oportunamente al usuario la información recogida. Tal y como fue

mencionado antes, en el caso del vídeo se utilizará la herramienta FFMPEG, que bien supondrá un aumento sensible de la carga computacional, razón por la cual se deja en manos del usuario la generación o no de dicho archivo. Toda la información producida se guardará en una carpeta ubicada en el mismo directorio que el propio código de Python, bajo el nombre de 'Resultados'.

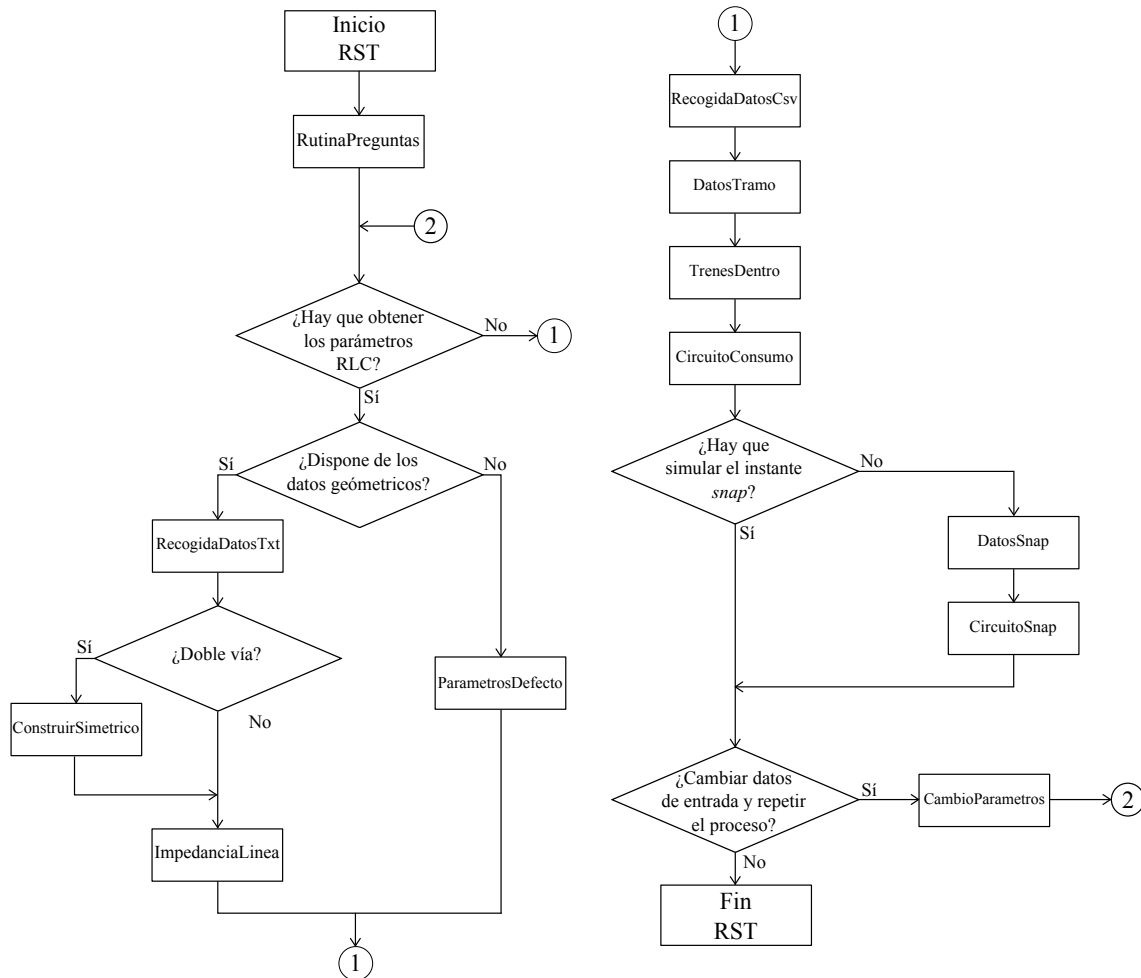


Figura 5.15 Diagrama de flujo implementado del RST. Elaboración propia.

## 5.3 RST: Construcción de la Vía

Una vez el lector sabe cómo es el proceder concreto de la herramienta y todos los pasos que conlleva, así como los resultados que se van a mostrar, ya está en condiciones de tratar la construcción del circuito en OpenDSS. Así pues, por último en este capítulo se explicará el único módulo restante, que al fin y al cabo es grueso y esencia de la presente herramienta: **CircuitoOpenDSS**. Como el propósito del documento no es explicar cómo se emplea OpenDSS como COM ni *standalone*, no se justificará cada línea de código expuesta, aunque sí que se realizarán los comentarios considerados oportunos para clarificar ciertos aspectos. Igualmente, a fin de no alargar innecesariamente el presente documento, según se vayan viendo procesos repetidos en los diferentes apartados del código, se aho-

rrarán las líneas de correspondientes a los mismos, mencionando solamente su nombre comentado donde proceda.

En un brindis a la simplicidad se le propone al lector llevar a cabo el análisis de la conformación del circuito a través de uno de los ocho casos posibles (recuerde, cuatro por tipo de configuración), el del sistema  $2 \times 25$  con cable de retorno y doble vía. Se considera una elección oportuna por las siguientes razones: CircuitoOpenDSS tiene una longitud superior a las 800 líneas, por lo que tratar cada caso alargaría innecesariamente el presente documento, y ciertamente los pasos a seguir en cada uno de los ocho casos son siempre los mismos, siendo precisamente aquel escogido como ejemplo el que tiene mayor número de particularidades y diferencias respecto a los demás. Por ello se considera prescindible, y recomendable, no incluir el resto de combinaciones posibles en su totalidad, aunque sí mencionar las diferencias existentes entre ellas.

### 5.3.1 OpenDSS como COM

Antes que nada es necesario importar los comandos oportunos para emplear OpenDSS como COM, sin estas líneas iniciales nada funcionaría. Además de importar el sistema operativo oportuno para manejar el programa, hay que iniciarlo y limpiar toda la información que hubiera en el registro. Una vez disponible la librería de funciones podremos emplear sus comandos, que para evitar escribir demasiado en cada línea se emplea la abreviación *DSSText=DSSObj.Text*, práctica casi siempre realizada en el uso de OpenDSS como COM.

A la hora de usar el programa como COM hay dos enfoques principales: explotar los comandos propios de esta manera de uso (no válidos como *standalone*), y emplear la función *DSSText.Command* para ir escribiendo línea a línea como se haría en OpenDSS de manera normal. A la hora de construir el modelo se ha optado por la segunda opción: por ser más familiar, intuitiva, y fácilmente exportable a la versión *standalone*. Así pues, siempre que queramos escribir un comando cualquiera, bastará con introducir en cada línea *DSSText.Command="LQS"*, siendo aquel texto entrecomillado el que se escribiría directamente en el panel principal de OpenDSS.

```
import win32com.client

DSSObj=win32com.client.Dispatch("OpenDSSEngine.DSS")
DSSObj.Start("0")
DSSText=DSSObj.Text
DSSText.Command="Clear"
```

Basta con introducir estas líneas introductorias para estar en plenas condiciones de utilizar OpenDSS a través de Python.

### 5.3.2 Variables Empleadas

A lo largo de la construcción de la vía se emplea un gran abanico de variables, de diferente índole y utilidad, muchas de ellas auxiliares y otras imprescindibles para el desarrollo de la actividad. Así pues, debido a la incontestable necesidad de emplear dichas variables, y al impacto que tienen en el propio devenir del módulo, antes de tratar la implementación en OpenDSS se propone realizar un oportuno análisis de los parámetros necesarios para la construcción.

Las primeras variables en entrar en juego son las ya vistas *dim*, cantidad de hilos equivalentes del sistema, y *F*, que indica la configuración eléctrica empleada. Estos parámetros

serán esencialmente utilizados para distinguir en qué caso nos encontramos (configuración y número de vías), ya que como sabe el lector la manera de proceder varía entre las diferentes situaciones. Mientras que los valores de  $dim$  serán exclusivamente escalares,  $F$  puede ser igual a  $1F$  o  $2F$ , según la configuración escogida sea  $1 \times 25$  o  $2 \times 25$  respectivamente.

Así pues, en el caso tomado como ejemplificativo para explicar, se tendría que  $F$  es igual a  $2F$  y que  $dim$  vale 8, pues por cada vía se tienen cuatro hilos equivalentes: raíl equivalente, catenaria equivalente, feeder y retorno.

**Tabla 5.1** Caso precedente según los valores de  $dim$  y  $F$ . Elaboración Propia..

	$dim = 2$	$dim = 3$	$dim = 4$	$dim = 6$	$dim = 8$
$F = 1F$	$1 \times 25$ una vía sin retorno	$1 \times 25$ una vía con retorno	$1 \times 25$ dos vías sin retorno	$1 \times 25$ dos vías con retorno	No procede
$F = 2F$	No procede	$2 \times 25$ una vía sin retorno	$2 \times 25$ una vía con retorno	$2 \times 25$ dos vías sin retorno	$2 \times 25$ dos vías sin retorno

En cuanto a la caracterización de la vía y el modelo que la refleja, se tienen las variables  $L$  longitud de la vía,  $cel$  tamaño de celda y  $AT$  distancia entre dos AT. Dichas variables serán las que marcarán las conexiones entre los diferentes elementos que conforman la catenaria, es decir, cuándo acaba una celda y empieza otra, cada cuántas celdas hay que ubicar un puesto de AT,... Elaborando dichas variables se obtienen los parámetros que orquestan la construcción per se, como serán **Celdas** número de celdas que componen las vía y **salto** cantidad de celdas entre dos puestos auxiliares consecutivos (PPS o AT).

A la hora de caracterizar la catenaria como línea eléctrica se necesitarán tres parámetros, como ya sabrá el lector: **RI** matriz de resistencias, **XI** matriz de reactancias, y **CI** escalar de capacidad. La utilización de estos parámetros se reduce únicamente a la declaración de la catenaria, como más adelante se verá.

Finalmente, las últimas variables necesarias para poder llevar a cabo la construcción adecuadamente son precisamente aquellas que caracterizan al proyecto: vector de potencias **P**, vector de posiciones **D** y vector de dirección del trayecto **sentidos**, que recuerde vienen comunicadas a CircuitoOpenDSS según proceda. Estas tres variables tienen la misma dimensión,  $1 \times n$ , donde  $n$  corresponde a la cantidad de trenes presentes en el tramo en el preciso instante considerado por la iteración. Así pues, cuando se quiera caracterizar al tren  $j$ -ésimo, habrá que tomar los elementos  $P[j]$   $D[j]$  y  $sentidos[j]$ .

Aquí es cuando se plasma la importancia de **sentidos**, que recuerde radica en que según el sentido de avance del tren habrá que ubicarlo en una vía o en otra, es decir, conectado entre la catenaria y raíl de ida o los de vuelta. Esto es ciertamente importante, pues tal y como fue explicado anteriormente, si bien dos trenes pueden tener el mismo valor en  $D$ , el hecho de que su sentido sea diferente, hace que se ubiquen en diferentes puntos de la vía.

Así pues, estos son los parámetros base necesarios para poder construir el circuito con OpenDSS. A lo largo del desarrollo a continuación verá un buen número de variables adicionales, pero o bien su importancia es nimia o su razón de ser es meramente computacional. En cualquier caso siempre que se considere oportuno se explicará brevemente la labor de cada variable desconocida.

### 5.3.3 Subestación y Conexión a la Vía

La creación de la vía en cada iteración siempre comienza con la elección de la configuración a emplear según la información de la que disponemos. Para ello se emplean las ya mencionadas variables  $dim$  y  $F$ . Ello se lleva a cabo mediante dos bloques *if*, el primero en lo que respecta al valor de  $F$  y el segundo en lo relativo a  $dim$ .

Para cada combinación de  $dim$  y  $F$  se hace siempre lo mismo: crear la **red de transporte** de referencia, declarar el **transformador** que representa la SE, conectarlo a la vía o a las vías, e indicar el **tipo de catenaria** que vamos a emplear.

Crear la red es básico y necesario en todos los circuitos de OpenDSS, ya que será el origen y la referencia de todo el modelo. Para ello se considerará una red trifásica de 132 kV de potencia de cortocircuito prácticamente infinita, tanto en cuanto permite el programa. Respecto a la SE, el transformador se declara según su número de fases e impedancia de cortocircuito. Tras ello se indica para cada arrollamiento los buses de conexión, tanto aguas arriba (red de transporte) como aguas abajo (vía), así como la tensión y potencia nominales de cada uno. De esta manera, para el caso de  $dim = 8$  y  $F = 2F$  se tiene:

```
if F=='1F': #Configuraciones del sistema 1x25
    DSSText.Command="New circuit.C1x25 basekv=132 phases=3 frequency="+str
    (f)+" MVAS1=99999 MVAS3=9999" #Se crea la red de transporte de
    conexión poderosa casi ideal, a la que se conecta la SE
    ...
elif F=='2F': #Configuraciones del sistema 2x25
    DSSText.Command="New circuit.C2x25 basekv=132 phases=3 frequency="+str
    (f)+" MVAS1=9999 MVAS3=9999" #Se crea la red de transporte de
    conexión poderosa casi ideal, a la que se conecta la SE
    ...
elif dim==8: #2x25 de doble vía y cable de retorno
    DSSText.Command="New Transformer.TrafoSE Phases=1 Windings=3 XHL="+
    str(ImpTSE) #Declaración del transformador de la SE
    DSSText.Command="more wdg=1 Bus=Sourcebus.1.2 kV=132 KVA=600000" #
    Arrollamiento primario
    DSSText.Command="more wdg=2 Bus=Bus0.1.3 kV=25 KVA=300000" #
    Arrollamiento secundario a +25 kV
    DSSText.Command="more wdg=3 Bus=Bus0.3.2 kV=25 KVA=300000" #
    Arrollamiento secundario a -25 kV
```

Llegado este punto es menester hacer la conexión a la segunda vía en caso de que esta exista, que por convenio se ha decidido que sea aquella cuyos trenes se acercan a la SE. Esto se realiza mediante los ya mencionados PPS, uniendo cada hilo de la primera vía con su homónimo de la segunda vía. Como ya fue mencionado, si en la configuración actual hay cable de retorno, la conexión se hará a éste, pero si no lo hay, se hará al raíl equivalente.

Para ello se emplean reactancias, cuyo valor será el estándar mencionado a lo largo de los anteriores capítulos. Llegado este punto es recomendable recordar cuál es el orden de los hilos en la matriz de impedancia y en el sistema en general en su caso completo: catenaria equivalente, feeder, cable de retorno y raíl equivalente. Este orden se repite tal cual en la extensión en doble vía, y es el empleado para relacionar entre sí todos los elementos del sistema. Así pues, tal y como se observa en el código, la SE se conecta a la segunda vía mediante tres cables de SSP, yendo el primero a la catenaria, el segundo al feeder, y el tercero al retorno.

```
elif dim==8:
```



```

...
DSSText.Command="New reactor.PPSSEA X=0.001 R=0.001 bus1=Bus0.1 bus2=
    Bus0.5" #Conexion catenaria-catenaria
DSSText.Command="New reactor.PPSSEB X=0.001 R=0.001 bus1=Bus0.2 bus2=
    Bus0.6" #Conexion feeder-feeder
DSSText.Command="New reactor.PPSSEC X=0.001 R=0.001 bus1=Bus0.3 bus2=
    Bus0.7" #Conexion retorno-retorno

```

Lo último que falta antes de proceder al bucle de construcción es declarar el tipo de catenaria de empleo. Ello se realiza mediante el comando *LineCode*, en el cual introducimos las matrices previamente calculadas. Una vez hecho, siempre que indiquemos que una vía es del tipo *Catenaria*, el programa le asignará los parámetros RLC declarados en este momento.

Declarar todos los elementos es tan simple como largo, basta con rellenar una matriz superior con todos sus valores. Como no representa ningún aspecto de especial interés, sólo se muestran los primeros elementos de cada matriz.

```

elif dim==8:
    ...
    DSSText.Command="New Linecode.Catenaria nphases=8"
    DSSText.Command="more Rmatrix=["+str(Rl[0,0])+ "|" +str(Rl[0,1])+ " "+str
        (Rl[1,1])+ "|" +str(Rl[0,2])+ " "+str(Rl[1,2])+ " "+str(Rl[2,2])+ "|" +
        str(Rl[0,3])+ "... #Matriz de resistencias
    DSSText.Command="more Xmatrix=["+str(Xl[0,0])+ "|" +str(Xl[0,1])+ " "+str
        (Xl[1,1])+ "|" +str(Xl[0,2])+ " "+str(Xl[1,2])+ " "+str(Xl[2,2])+ "|" +
        str(Xl[0,3])+ "... #Matriz de reactancias
    DSSText.Command="more Cmatrix=["+str(Cl*10**9)+"|" +str(Cl*10**9)+" " +
        str(Cl*10**9)+"|" +str(Cl*10**9)+" " +str(Cl*10**9)+" " +str(Cl
        *10**9)+"|" +str(Cl*10**9)+... #Matriz de capacidades

```

Aquí se ejemplifica claramente que mientras que los valores de *R* y *L* pueden ser todos diferentes, los de *C* no, por todos los motivos expuestos extensamente en previos capítulos.

### 5.3.4 Construcción de la Vía

Una vez llevadas a cabo todas las acciones previas, que son de índole puntual, se comienza a iterar el bucle de construcción para ir creando paso a paso, celda a celda, todo el tramo indicado por el usuario.

Se repetirá el proceso **tantas veces como celdas haya**, completando como mínimo en cada iteración una celda. El bucle será gobernado mediante las siguientes variables auxiliares: *i* indicará las celdas ya completadas, *j* los trenes ya ubicados, *w* los convoyes ya presentes dentro de una misma celda, y *acum* los metros creados de la presente celda hasta el último tren dentro de la misma. Empleando estas variables es posible sortear todas las barreras posibles y vicisitudes a lo largo del proceso.

```

j=0 #Ningun tren dispuesto
if F=='1F': #Construccion de los escenarios a 1x25
    ...
elif F=='2F': #Construccion de los escenarios a 2x25
    ...
    elif dim==4 or dim==8: #Se considera cable de retorno
        if dim==4: #Una via
            conbus='.1.2.3.4'
        elif dim==8: #Dos vias

```

```

conbus='.1.2.3.4.5.6.7.8'

#Declaracion inicial de variables auxiliares
i=0    #Ninguna celda creada
acum=0
w=0
while i<Celdas:  #Comienza el bucle principal que repasa todos los
                  escenarios considerados
    #Caso 1
    ...

    #Caso 2
    ...

    ...

```

Para ahorrar líneas de código **se concentran los escenarios posibles de dos en dos**, según la configuración sea  $1 \times 25$  o  $2 \times 25$  y se tenga cable de retorno o no. Así pues, el mismo proceso que emplea la configuración de doble vía tomada como ejemplo ( $dim = 8, F = 2F$ ) también lo utiliza aquella de una única vía ( $dim = 4, F = 2F$ ). Por ello, justo antes de empezar el bucle hay que asignarle valores a la variable **conbus**, que será aquella que transmita a OpenDSS cómo conectar una celda con la siguiente.

Se procede ahora a ver los diferentes **casos contemplados** en lo que a la posición del tren en la vía corresponde. Todas estas situaciones posibles cubren cualquier posibilidad, por lo que pasar de una a otra hasta el final permite construir el tramo sin incidencia alguna.

El primer escenario a considerar es aquel en el que **el próximo tren se encuentra totalmente fuera de la celda** que se está declarando en el presente ciclo, que ciertamente es el más común de todos. En ese caso se construye la celda entera, con los IB instalados al principio de la misma, y si es el caso habrá que hacer la conexión a los AT (estas conexiones habrá que realizarlas cada vez que se declare una celda). Una vez realizadas todas las acciones se aumenta en uno la cantidad de celdas creadas.

```

while i<Celdas:
    if cel*(i+1)<D[j]:  #Proximo tren más allá de la presente celda
        #Construccion de celda completa
        DSSText.Command="New line.Celda"+str(i)+" Bus1=Bus"+str(i)+str(
            conbus)+" Bus2=Bus"+str(i+1)+str(conbus)+" length="+str(cel)+"
            linecode=Catenaria phases="+str(dim) #Se crea la celda entera
        DSSText.Command="New reactor.IB"+str(i)+"A X=0.001 R=0.001 bus1=Bus
            "+str(i)+".3 bus2=Bus"+str(i)+".4 phases=1" #Se instalan los IB
            de la primera via
        DSSText.Command="New reactor.IB"+str(i)+"B X=0.001 R=2.001 bus1=
            Bus"+str(i)+".4 bus2=Bus"+str(i)+".0 phases=1"
        if dim==8:  #En caso de doble via...
            DSSText.Command="New reactor.IB"+str(i)+"C X=0.001 R=0.001 bus1
                =Bus"+str(i)+".7 bus2=Bus"+str(i)+".8 phases=1" #Se
                instalan los IB de la segunda via
            DSSText.Command="New reactor.IB"+str(i)+"D X=0.001 R=2.001 bus1
                =Bus"+str(i)+".8 bus2=Bus"+str(i)+".0 phases=1"

        #Instalacion de puntos auxiliares
        if isalto==0:  #Si procede ubicar los AT...
            DSSText.Command="New Transformer.Autotrafo"+str(i)+" phases=1
                windings=2" #Se crea el AT y conecta a la via

```

```

DSSText.Command="more wdg=1 Bus=Bus"+str(i)+".1.3 kV=25 kVA
=30000"
DSSText.Command="more wdg=2 Bus=Bus"+str(i)+".3.2 kV=25 kVA
=30000"
DSSText.Command="more xhl="+str(ImpAT)
if dim==8: #En caso de doble via...
    DSSText.Command="New reactor.PPS"+str(i)+"A X=0.001 R=0.001
        bus1=Bus"+str(i)+".1 bus2=Bus"+str(i)+".5 phases=1" #Se
        conectan en paralelo las vias con el PPS
    DSSText.Command="New reactor.PPS"+str(i)+"B X=0.001 R=0.001
        bus1=Bus"+str(i)+".2 bus2=Bus"+str(i)+".6 phases=1"
    DSSText.Command="New reactor.PPS"+str(i)+"C X=0.001 R=0.001
        bus1=Bus"+str(i)+".3 bus2=Bus"+str(i)+".7 phases=1"

#Actualizacion de variables
i=i+1 #Una celda mas terminada
acum=0
w=0

```

El segundo caso pertinente es aquel en el que **el próximo tren se encuentra totalmente dentro de la celda** que ocupa al código. Esta es la situación más compleja de todas, pues debe contemplar que igualmente un próximo tren se encuentre en la misma celda, o uno anterior ya esté dentro.

Supóngase que no había tren alguno dentro: en este caso se construye la celda hasta donde se encuentra el tren, se ubica el mismo, y se actualiza la cantidad de trenes instalados. Antes de continuar, el código ha de ver si un próximo convoy se encuentra dentro de la misma celda, si no es así la celda se concluye y se pasan a considerar el resto de casos, pero si efectivamente hay otro tren en la celda, ésta se deja abierta. Así pues, en la próxima iteración, cuando el código comprobara en qué escenario se está, volvería a entrar en este apartado, pero en lugar de crear la celda desde cero, la continuaría desde donde la ha dejado antes, utilizando la variable *acum*. Así se haría todas las veces necesarias hasta que no hubiera más trenes en la presente celda.

Cabe destacar que toda esta labor queda por duplicada al deberse tener en cuenta el caso en el que el tren estuviera casi sobre un IB o muy cercano a otro convoy. Mientras que ello físicamente no implica nada especial, a nivel de OpenDSS un tramo de línea cualquiera menor que cierto tamaño viene sustituido por una impedancia estándar, que varía drásticamente los resultados obtenidos, creando picos ficticios de potencia de varias veces el consumo nominal. Para evitar el dantesco problema se ha decidido que si el tren se ubica a menos de 10 cm de otro convoy o de un IB, se sustituye ese mínimo trozo de catenaria por otro de 10 m.

```

while i<Celdas:
    ...

    if cel*(i+1)>D[j] and cel*i<D[j]: #Tren dentro de la actual celda
        if (D[j]-i*cel-acum)<0.0001: #Si distancia a construir muy pequeña
            ...
            if w!=0: #Si ya habia trenes en la celda...
                #Construccion parcial de celda ya empezada
                DSSText.Command="New line.Celda"+str(i)+alpha[w]+" Bus=
                    BusTren"+str(j-1)+str(conbus)+" Bus2=BusTren"+str(j)+str
                    (conbus)+" length=0.01 linecode=Catenaria phases="+str(

```

```

        dim) #Se completa la celda ya empezada hasta alcanzar el
            tren

        #Ubicacion del tren
        if sentido[j]==0: #Si el tren es de ida...
            DSSText.Command="New load.Tren"+str(j)+" bus1=BusTren"+
                str(j)+".1.4 phases=1 kw="+str(P[j])+" pf=0.995 kv
                =25 model=1 conn=del vminpu=0.8" #Se ubica el tren
                en la primera via
        else: #Si el tren es de vuelta...
            DSSText.Command="New load.Tren"+str(j)+" bus1=BusTren"+
                str(j)+".5.8 phases=1 kw="+str(P[j])+" pf=0.995 kv
                =25 model=1 conn=del vminpu=0.8" #Se ubica el tren
                en la segunda via

        else: #Si es el primer tren dentro de la celda...
            #Construccion parcial de celda
            DSSText.Command="New line.Celda"+str(i)+alpha[w]+" Bus=Bus"
                +str(i)+str(conbus)+" Bus2=BusTren"+str(j)+str(conbus)+"
                length=0.01 linecode=Catenaria phases="+str(dim) #Se
                crea la celda desde cero hasta alcanzar la posicion del
                tren.

            ...
            #Instalacion de puntos auxiliares
            ...
            #Ubicacion del tren
            ...

    else: #Si la distancia no fuera tan pequeña...
        #Se repite todo lo anterior, pero con una longitud de celda de
        D[j]-i*cel-acum en lugar de 0.01.

        ...
        #Actualizacion de variables
        j=j+1
        w=w+1

        #Casos en los que hay que cerrar la celda ya abierta:
        if D[j]>(i+1)*cel: #Tren absolutamente fuera de la celda
            if (cel-acum)<0.001: #Si la distancia a construir hasta cerrar
                es muy pequeña...
                #Construccion parcial de celda
                ...
            else: #Si no lo es...
                #Construccion parcial de celda
                ...
            #Actualizacion de variables
            i=i+1
            acum=0
            w=0

    elif D[j]==(i+1)*cel: #Tren justo al final de la celda
        #Construccion parcial de celda
        ...
        #Ubicación del tren
        ...
        #Actualizacion de variables

```

```

j=j+1
i=i+1
acum=0
w=0

```

Los demás escenarios son más sencillos que el anterior, como el lector podrá sospechar. En concreto el próximo caso considerado es aquel en el que **el tren se encuentra justo al final de la celda** que ocupa a la iteración. Este escenario sólo tiene dos particularidades: la primera es que el tren no va a tener su bus en particular, sino que se ubicará en el propio de la celda, y la segunda es que como medida preventiva se considera el caso en el que coincidan varios trenes en el mismo punto. Esto es posible cuando ambos viajan por vías diferentes, pero igualmente se abre el caso de que se de cuando transitan por la misma, para evitar en cualquier caso errores fatales de programación.

```

while i<Celdas:
    ...
    elif cel*(i+1)==D[j]:
        #Construccion de celda completa
        ...
        #Instalacion de los puntos auxiliares
        ...
        #Ubicacion del tren
        ...
        #Búsqueda de trenes situados en el mismo punto
        aux=j
        for h in range(len(D)): #Para todos los trenes que quedan...
            if j<(len(D)-1):
                if D[j+1]==D[aux]: #Si se encuentran en la misma situacion
                    que el actual...
                    j=j+1
                    #Proceso de ubicacion del tren
                    ...
        #Actualizacion de variables
        i=i+1
        j=j+1
        w=0
        acum=0

```

El último caso por considerar es el más restrictivo e infrecuente, que es aquel en el que **el tren se ubica justo en el punto de conexión a la SE**. Obviamente es una situación que siempre ocurre en la vida real, pero a la hora de simular raras veces da lugar que en una iteración se dé esta coincidencia exacta. En cualquier caso, las acciones a llevar a cabo son justo las mismas que en el caso anterior, entonces ¿por qué un apartado concreto para esta situación? pues debido a que en el escenario anterior el tren siempre se encontraba *al final* de la celda por construir, así que este caso nunca quedaba cubierto. Cabe destacar que este es la única situación en la que no se contempla la posibilidad de instalar un AT ni PPS al final de la celda, ya que precisamente se encuentra al inicio de la misma el transformador de la SE y sus conexiones entre vías.

```

while i<Celdas:
    ...
    elif 0==D[j]: #El tren se ubica justo al comienzo del tramo
        #Construccion completa de celda
        ...

```

```

#Ubicacion del tren
...
#Búsqueda de trenes situados en el mismo punto
...
#Actualizacion de variables
i=i+1
j=j+1
w=0
acum=0

```

Así acabarían todas las situaciones posibles en las que un tren puede ubicarse en lo relativo a su posición respecto a las celdas de la vía. Una vez se haya iterado tantas veces como celdas haya, el modelo estará listo, y solo quedará cerrar el tramo en cuestión. Para ello, recuerde de lo visto en capítulos anteriores, sólo hay que instalar un último AT e IB, ya que tal y como fue explicado los DPP no se incluyen en el modelo.

```

while i<Celdas:
    ...

if L%AT!=0: #Si la longitud del tramo no es proporcional a la distancia
    entre AT
    DSSText.Command="New Transformer.Autotrafo"+str(int(Celdas))+ " phases
    =1 windings=2"
    DSSText.Command="more wdg=1 Bus=Bus"+str(int(Celdas))+ ".1.3 kV=25 kVA
    =30000"
    DSSText.Command="more wdg=2 Bus=Bus"+str(int(Celdas))+ ".3.2 kV=25 kVA
    =30000"
    DSSText.Command="more xhl="+str(ImpAT)
    if dim==8:
        DSSText.Command="New reactor.PPS"+str(int(Celdas))+ "A X=0.001 R
        =0.001 bus1=Bus"+str(int(Celdas))+ ".1 bus2=Bus"+str(int(Celdas))
        )+" .5 phases=1"
        DSSText.Command="New reactor.PPS"+str(int(Celdas))+ "B X=0.001 R
        =0.001 bus1=Bus"+str(int(Celdas))+ ".2 bus2=Bus"+str(int(Celdas))
        )+" .6 phases=1"
        DSSText.Command="New reactor.PPS"+str(int(Celdas))+ "C X=0.001 R
        =0.001 bus1=Bus"+str(i)+ ".3 bus2=Bus"+str(i)+ ".7 phases=1"

    DSSText.Command="New reactor.IB"+str(Celdas)+"A X=0.001 R=0.001 bus1=Bus"+
    str(Celdas)+ ".3 bus2=Bus"+str(Celdas)+ ".4 phases=1"
    DSSText.Command="New reactor.IB"+str(Celdas)+"B X=0.001 R=2.001 bus1=Bus"+
    str(Celdas)+ ".4 bus2=Bus"+str(Celdas)+ ".0 phases=1"
    if dim==8:
        DSSText.Command="New reactor.IB"+str(Celdas)+"C X=0.001 R=0.001 bus1=
        Bus"+str(Celdas)+ ".7 bus2=Bus"+str(Celdas)+ ".8 phases=1"
        DSSText.Command="New reactor.IB"+str(Celdas)+"D X=0.001 R=2.001 bus1=
        Bus"+str(Celdas)+ ".8 bus2=Bus"+str(Celdas)+ ".0 phases=1"

```

De esta manera se completa el modelo eléctrico que recrea un estado concreto de la vía a lo largo del tránsito de los convoyes declarados por el usuario. Antes de proceder a la simulación y extracción de resultados, se considera oportuno indicar qué diferencias hay entre el ejemplo indicado y los otros tres procedimientos posibles.

Al darse el caso de **configuración**  $1 \times 25$ , los PATP dejan de existir, al igual que el cable feeder, por lo que el sistema en general se simplifica, solamente conectando entre sí en los PPS las catenarias y los cables de tierra. Cuando el sistema **carece de cable de retorno**,

la SE y los PPS deberán conectarse a los raíles en su lugar, ya que será el único conductor de tierra disponible. En cuanto al IB, su función será exclusivamente la de puesta a tierra, pues no habrá cable de retorno al que conectar los raíles. Si solamente tenemos una **única vía**, los PPS no proceden, quedando el resto de aspectos inalterados. Combinando dichas condiciones y aplicando sus repercusiones al ejemplo tomado, se obtienen fácilmente el resto de casuística.

### 5.3.5 Resolución

Ya acabado el circuito, lo único que queda por hacer para poder extraer los resultados es especificar cómo se quiere resolver el presente modelo. Para ello se debe declarar un aparato de medida *energymeter*, que recogerá los intercambios de potencia acontecidos en el bus donde se instale (arrollamiento primario del transformador de la SE en este caso), igualmente se debe establecer la base pu de las tensiones, obligar al programa a calcularlas, establecer la frecuencia empleada, 43'3 kV en este caso, e indicar un máximo de iteraciones (principalmente a para detectar posibles problemas de divergencia). Finalmente se le comunica al programa que debe resolver según lo especificado, y ya se estaría en condiciones de recoger los resultados arrojados por la simulación, una vez esta termine.

```
while i<Celdas:
    ...

    DSSText.Command="New energymeter.feeder transformer.trafoSE 1"
    DSSText.Command="Set voltagebases=[43.3]"
    DSSText.Command="Calc voltagebases"
    DSSText.Command="Set frequency="+str(f)
    DSSText.Command="set maxiter=100"
    DSSText.Command="Solve"
```

De esta manera el presente módulo cumple su cometido y le devuelve a CircuitoConsumo o CircuitoSnap las variables necesarias, terminando así su labor.





## 6 Evaluación del Railway Simulation Tool

---

Llegado este punto, el lector ya conocerá adecuadamente el proceder y la implantación de la herramienta que ocupa al documento, por lo que finalmente estará en plenas capacidades de analizar los resultados arrojados por la misma y su veracidad. Así pues, en este capítulo se propone el estudio de la aplicación de varias situaciones diferentes a *RST*, para así poner en tela de juicio tanto su utilidad como su acercamiento a la realidad mediante los instrumentos disponibles.

Igualmente en este capítulo se llevará a cabo una comparación de cómo afecta al desempeño de un mismo trayecto el empleo del sistema  $1 \times 25$  o el  $2 \times 25$ , según los resultados arrojados por la herramienta. De esta manera se podrá poner finalmente en valor el interés o no en el utilizo del sistema de AT, así como el contraste entre el discurso teórico y los resultados obtenidos.

### 6.1 Casos de Estudio

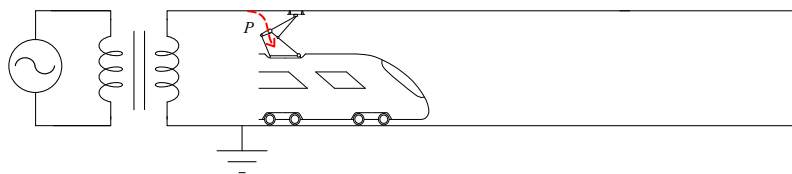
Así pues, sin más dilación se procede al análisis de los casos considerados como adecuados para llevar a cabo el estudio valorativo. Para ello se irán repasando las configuraciones más comunes, yendo desde aquellas más simples hasta las más complejas. En favor a la cercanía a la realidad y a la simplicidad del análisis se considerará siempre el empleo de cable de retorno, que a fin es una práctica más que común.

En esta sección simplemente se presentarán y describirán los escenarios considerados, reservando el análisis de su bondad y veracidad global para el siguiente apartado, en el que sí se precisaran de los instrumentos disponibles para poder afirmar una conclusión fundada y sustentada en argumentos sólidos.

#### 6.1.1 Tren a Tracción en Vía Única a $1 \times 25$

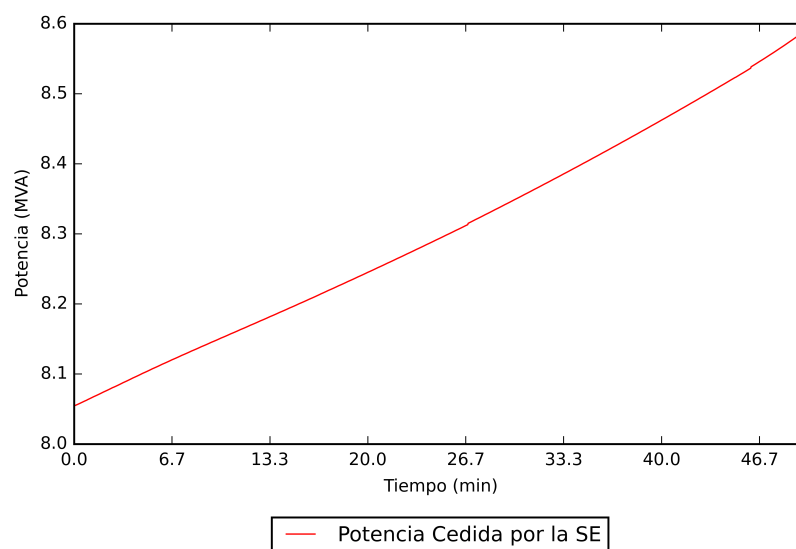
Se comienza tratando la configuración más simple posible: un único tren viajando a tracción a lo largo de un trayecto de vía única alimentado a  $1 \times 25$ . Este escenario se empleará igualmente para razonar qué resultados esperar según las condiciones dadas, y si las expectativas quedan reflejadas en los resultados arrojados por la herramienta. Para recrear este escenario se ha considerado un tren circulante a velocidad constante consumiendo 8

MW permanentes en el tiempo, dentro de un tramo de 30 km con celdas de 400 m, eligiendo para el resto de parámetros implicados los valores típicos mostrados previamente a lo largo del desarrollo del presente documento.



**Figura 6.1** Representación del primer caso de estudio. Elaboración propia.

¿Qué cabe esperar de la simulación? Teniendo un sistema  $1 \times 25$  podemos asegurar que la cesión de potencia por parte de la SE irá creciendo a lo largo del tiempo según el tren se aleja de la misma. Justo al principio, cuando el tren pasa por las inmediaciones de la conexión al transformador reductor, se dará el punto de menor consumo, que será *ligeramente superior* a la potencia nominal del tren ¿Por qué ligeramente superior? Sería igual si no fuera por las pérdidas que acontecen en el propio transformador y en la conexión del mismo a la vía, pero al no ser ideales siempre habrá una mínima diferencia. Según avanza el convoy aumentan las pérdidas en los hilos, hasta que se da el pico de consumo justo antes de entrar en la sección neutra.

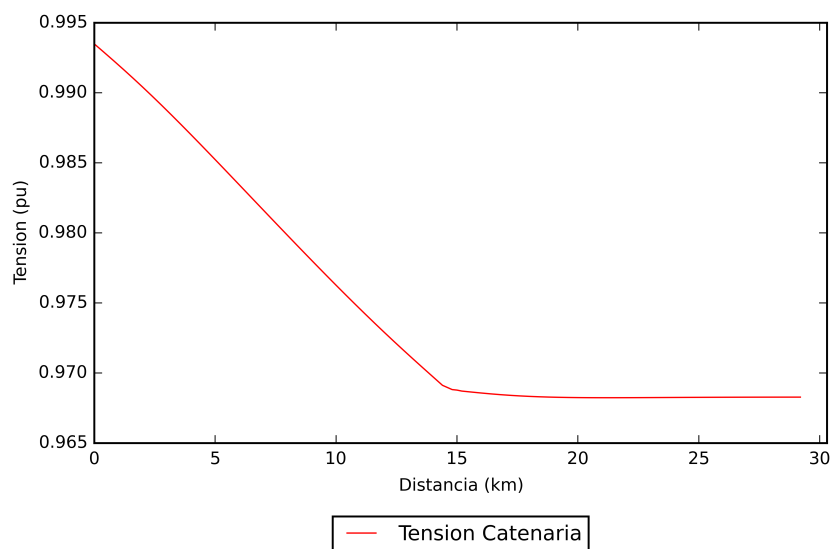


**Figura 6.2** Curva de consumo resultante del primer caso de estudio. Elaboración propia.

Tal y como se puede observar en la figura adjunta, nuestras expectativas se cumplen, y ciertamente la cesión de potencia por parte de la SE va aumentando de manera casi lineal (con un tramo mayor se apreciaría una tendencia parabólica debido a la dependencia parcial de las pérdidas en la catenaria con el cuadrado de la corriente) desde los aproximadamente 8'5 MVA hasta los 8'6 MVA, suponiendo hasta alrededor de 660 kVA invertidos en pérdidas, que equivale aproximadamente a un 5'7% del consumo nominal del convoy.

Respecto al perfil de tensiones, se puede predecir que tendrá una forma similar a aquel de la alimentación en punta a CC, es decir, un decrecimiento lineal hasta el propio tren,

para entoces adoptar una evolución horizontal, ya que a partir de ese punto la circulación teórica de corriente es nula.



**Figura 6.3** Perfil de tensiones resultante del primer caso de estudio. Elaboración propia.

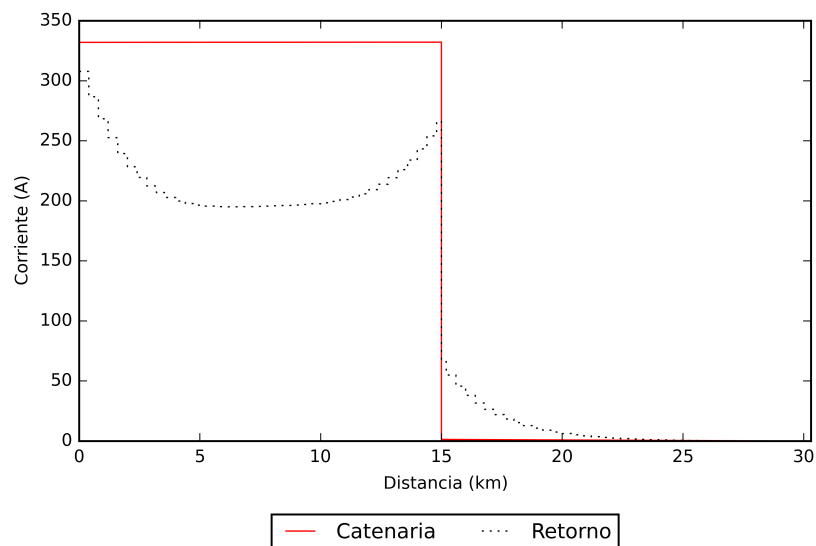
Efectivamente, la figura creada por la herramienta, que muestra al tren ubicado a 15 km de la SE, ratifica lo esperado y confirma que la forma es la esperada. Se puede apreciar que hay una caída de tensión que no depende de la posición del tren, ya que la tensión del punto de la catenaria donde se da la conexión a la SE es de aproximadamente 0'993 en lugar de 1 pu, lo cual se debe a la no idealidad de los elementos de transformación y conexión a la vía. Para la mencionada posición del tren la caída de tensión a lo largo de la catenaria resulta de aproximadamente 0'028 pu, lo cual equivale a unos 700 V de diferencia entre la tensión en bornas del transformador y de aquella que ve el pantógrafo del convoy.

Por otra parte, el vídeo generado por el código, que por razones obvias no puede mostrarse en la versión papel del presente documento, nos hace saber que la tensión mínima de contacto posible es de aproximadamente 0'92 pu, siendo así la caída máxima de tensión de 0'08 pu, es decir, de unos 2000 V. Como podrá sospechar el lector este parámetro verá reducido su valor con el empleo de la configuración  $2 \times 25$ .

Finalmente, respecto a la distribución de corrientes, lo que se espera es que la corriente desde la SE hasta el pantógrafo tenga un valor constante, suficiente como para portar la potencia necesaria para la tensión de contacto dada.

Respecto a la corriente circulante por los conductores a tierra, se da el siguiente fenómeno: cada vez que la corriente de retorno pase por un IB y su puesta a tierra, *tendrá que decidir* si continuar circulando por ellos o bien fugarse a tierra, lo cual dependerá tanto de la impedancia efectiva que ofrece cada camino posible hasta la SE como de la cercanía al punto de conexión a la misma; al fin y al cabo la corriente que sale por un lado del arrollamiento del transformador tiene que ser la misma que la que entra por el otro, y como la conexión se realiza al cable de retorno, toda corriente devuelta tiene que terminar circulando por el mismo. Así pues, la superposición de estos dos efectos hace pensar que la corriente circulante por los conductores de tierra (es decir, raíl equivalente e hilo de re-

torno) presentará una forma similar a la de una parábola de convexidad negativa, teniendo aproximadamente su mínimo en el punto medio entre tren y SE. Igualmente se sospecha que parte de la corriente circulará cierto tramo a lo largo de los raíles alejándose de la SE, para más tarde fugarse a tierra y volver a la SE.

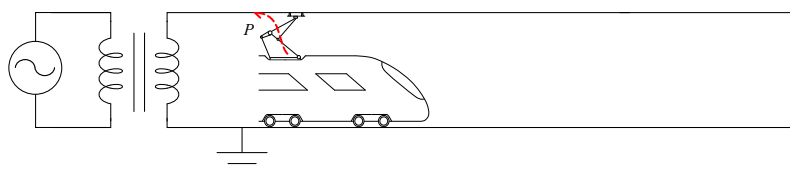


**Figura 6.4** Distribución de corrientes resultante del primer caso de estudio. Elaboración propia.

Tal y como muestra la figura adjunta las sospechas eran correctas, y efectivamente se da el comportamiento predicho. Así pues, la corriente circula a lo largo de la catenaria hasta llegar el pantógrafo, para más tarde realizar la vuelta a la SE a través de raíl y retorno por un lado, y tierra por otro. Igualmente se aprecia la mencionada forma similar a la parábola, que no presenta una forma simétrica debido a la parte de la corriente de los raíles que circulaba hacia la derecha, y que termina volviendo a la SE a través de la tierra hasta las inmediaciones de la misma.

### 6.1.2 Tren en Frenada en Vía Única a 1x25

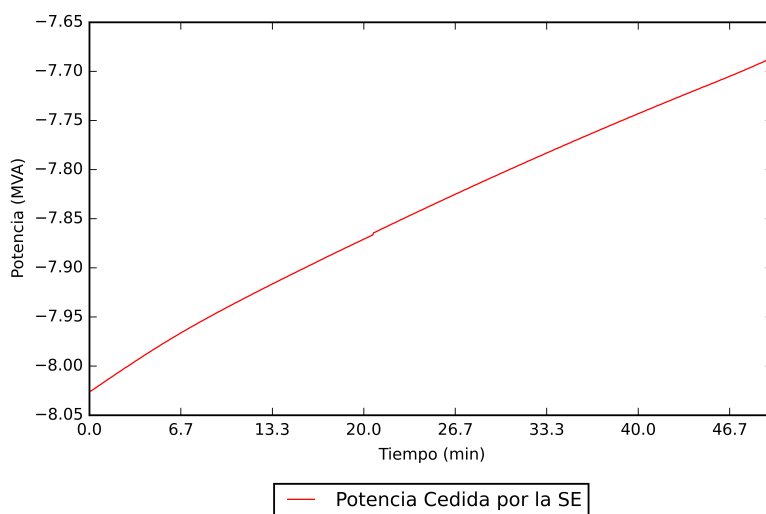
A continuación se repite el escenario anterior, con la única diferencia de que en esta ocasión el tren está aplicando la frenada regenerativa a lo largo de todo su avance por el tramo (lo cual es imposible en realidad), inyectando, en lugar de consumiendo, 8 MW en la red.



**Figura 6.5** Representación del segundo caso de estudio. Elaboración propia.

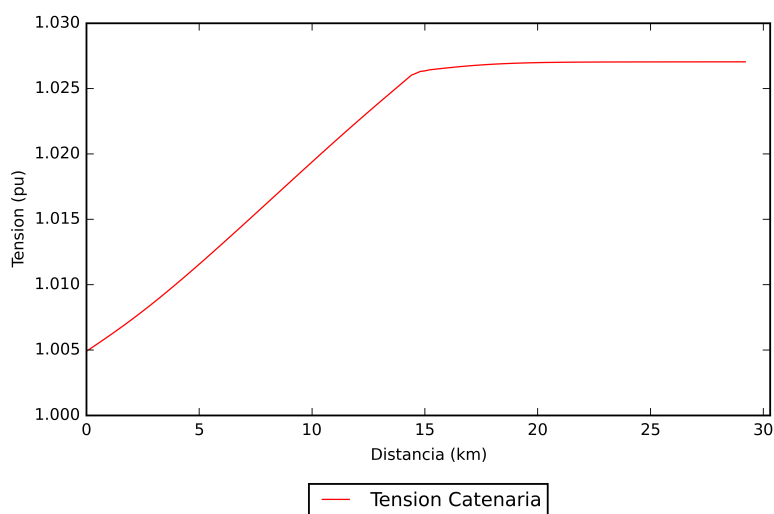
En general se espera que los resultados sean aproximadamente opuestos a los del caso anterior: potencia efectiva inyectada en decrecimiento según se aleja el convoy, tensión de

contacto superior a la unidad igualmente en ascenso desde el 1 pu en la conexión a la SE, y corriente en la catenaria circulante en sentido opuesto.



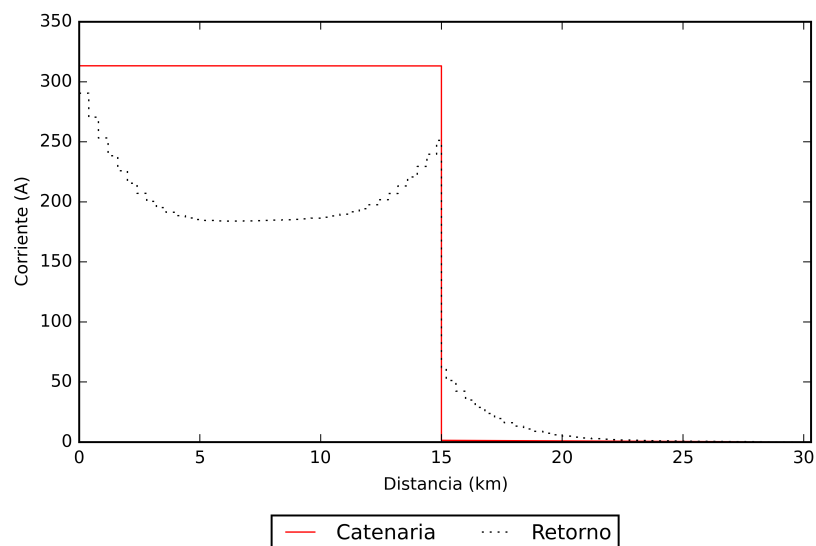
**Figura 6.6** Curva de consumo resultante del segundo caso de estudio. Elaboración propia.

A la vista está que en lo que respecta a la evolución del consumo de potencia, se cumplen las expectativas. Efectivamente la curva resulta exactamente igual que antes, pero en valores de absorción de potencia por parte de la SE. Igualmente se da una evolución casi lineal (que de nuevo se asemeja más a una de segundo orden), aunque en esta ocasión el valor de la transferencia de potencia en términos absolutos se reduce según avanza el convoy. Que decir tiene que esta situación es teórica y lejana de la realidad debido a dos motivos: no hay convoy alguno que realice un trayecto en frenada durante casi 40 km, y si esto se diera la transmisión de potencia a la catenaria tendría un valor significativamente menor al de consumo nominal, presentando un fuerte descenso en su valor con el tiempo.



**Figura 6.7** Perfil de tensiones resultante del segundo caso de estudio. Elaboración propia.

De igual manera se reproduce inversamente el perfil de tensiones, recreándose análogamente el salto de tensión entre el punto de conexión de la vía a la SE y el arrollamiento secundario del transformador. Así pues, a los 15 km de distancia, la tensión de contacto resulta de aproximadamente 1'028 pu, que suponen 700 V como en el caso anterior, pero en esta ocasión de subida en lugar de caída. De igual manera se reproduce el fenómeno del caso a tracción, aunque de manera dual, cuando el tren se ubica en el confín del tramo.



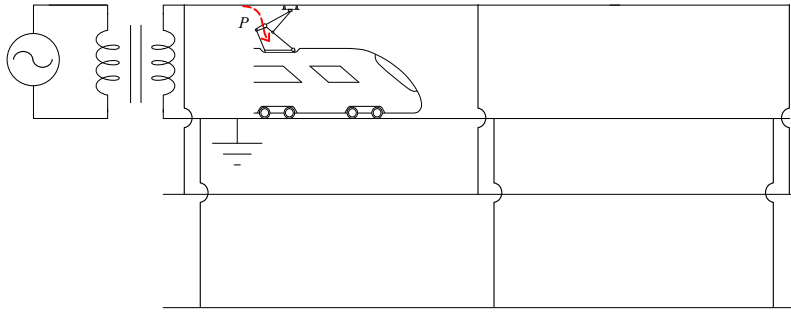
**Figura 6.8** Distribución de corrientes resultante del segundo caso de estudio. Elaboración propia.

Finalmente, la distribución de tensiones presenta una forma exactamente igual a la del caso anterior ¿Cómo es posible? Lo es debido a que la gráfica adjunta lo que muestra es la magnitud de la intensidad, no su fase, por lo que si bien el sentido de la corriente será justo el opuesto, su valor en Amperios será el mismo.

### 6.1.3 Tren a Tracción en Vía Doble a 1x25

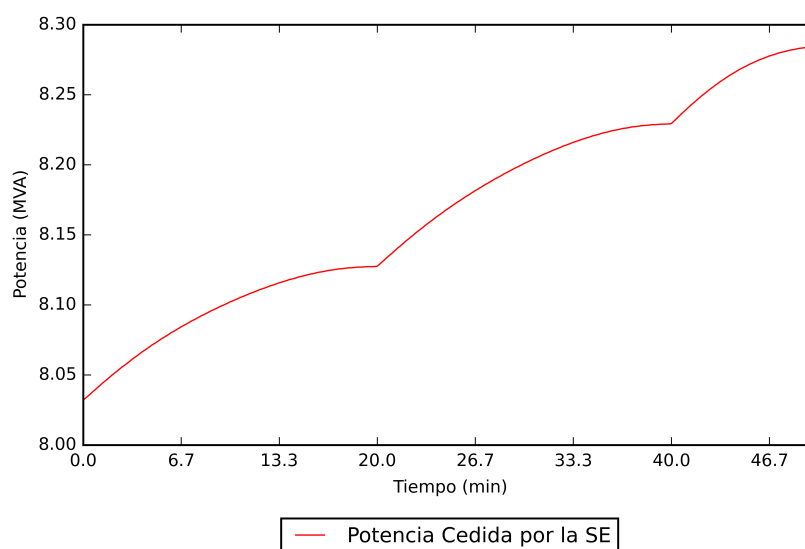
El tercer caso a considerar es aquel que considera la existencia de una segunda vía no circulada, que a pesar de que no lo parezca, introduce más que sensibles cambios en los resultados obtenidos previamente. Para recrear este escenario se ha considerado un caso similar a los anteriores: un tren circulante a velocidad constante consumiendo 8 MW permanentes en el tiempo dentro del mismo tramo, pero con otra vía de características similares conectada en paralelo mediante PPS cada 12 km.

En esta ocasión realizar una predicción cualitativa es más complejo que en las situaciones anteriores, pues si bien en escenarios previos solamente había un camino para transportar la corriente hasta el pantógrafo del convoy, ahora hay dos: su propia vía y la paralela, lo cual tendrá repercusiones notorias a todos los niveles. Lo que sí que se puede adelantar sin ningún género de dudas es que los resultados van a ser mejores, debido a que la *impedancia efectiva* ahora es menor al emplear el doble de conductores que antes.



**Figura 6.9** Representación del tercer caso de estudio. Elaboración propia.

Sea como fuere, teniendo en cuenta este aspecto de nueva introducción, se puede afirmar que la tendencia general de la potencia cedida por la SE ante el paso del convoy será creciente, aunque ciertamente habrá que tener en cuenta fenómenos a menor escala: cuando el tren esté pasando justo por un PPS, la corriente le llegará siempre desde la SE, siendo transportada por ambas vías; pero cuando se encuentre entre dos PPS, le llegará corriente tanto desde la SE como desde el otro lado de la catenaria, ya que parte de la corriente asumida por el pantógrafo circulará a través de la otra vía, emulando de alguna manera el efecto de la doble alimentación a CC. Así pues, si bien la situación en la que el tren se ubica poco después del PPS puede ser similar a las anteriores dado que apenas le llega corriente por el lado opuesto, cuando se vaya acercando a un PPS por la izquierda la proporción de corriente circulando por la vía paralela será magna. Este fenómeno se debería reflejar en la evolución de la cesión de potencia en una ralentización del incremento de la misma, al ganar peso la reducción de la impedancia efectiva según el tren se acerca al próximo PPS, lo cual se repetiría para cada PPS. Esta reducción no debería producir en ningún momento que la cesión de potencia disminuyera según avanza el tren, ya que en el caso más favorable la cantidad de corriente circulante por cada vía es la misma, lo cual implicaría una evolución horizontal de la potencia.



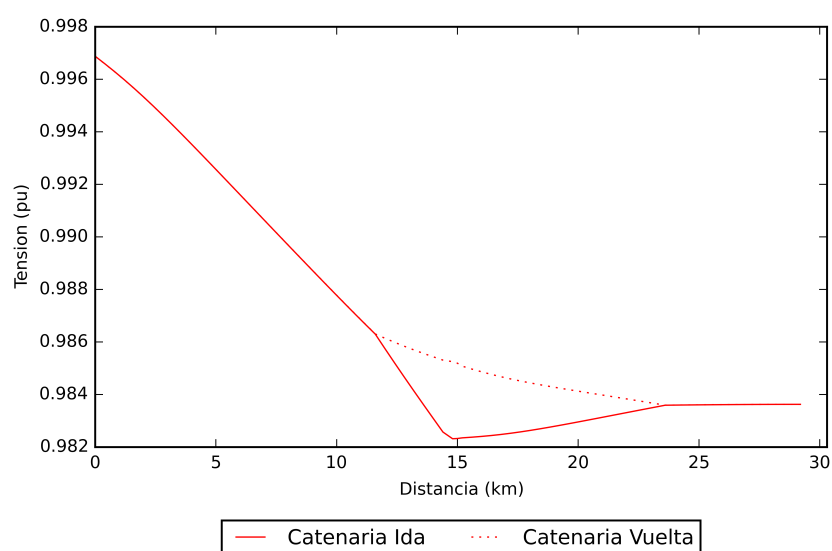
**Figura 6.10** Curva de consumo resultante del tercer caso de estudio. Elaboración propia.

La figura adjunta muestra la versión cuantitativa del discurso previamente realizado. A la vista está que la derivada de la cesión de potencia con el tiempo es máxima justo al pasar un PPS, mientras que es mínima metros antes. Como ya se dijo, este efecto era de esperar, pues cuanto mayor sea la proporción de corriente circulante por la vía paralela, menor será la impedancia que ve el tren en términos efectivos. Por ello se da esa forma "rizada", donde cada pico corresponde a un PPS.

Así pues, justo tras pasar por delante de un PPS, la tensión de contacto crecerá con una tendencia similar a la de los casos anteriores debido a que apenas le llegará corriente al convoy por el lado derecho, pero según avance y la proporción de corriente que circule por la vía paralela aumente, el incremento de tensión se ralentizará hasta prácticamente anularse justo en el siguiente PPS.

Cabe destacar la notable mejora en los resultados arrojados, ya que si bien en la configuración de una única vía la cesión máxima de potencia alcanzaba los 8'6 MVA, mientras que en esta ocasión no llega a los 8'3 MVA. Por otra parte el mínimo se mantiene igual, lo que era de esperar, ya que las pérdidas mínimas están únicamente asociadas al transformador de la SE y a la conexión a la catenaria, por lo que el hecho de emplear una vía o dos resulta irrelevante en este aspecto.

Como gran novedad, ahora el perfil de tensiones incluye también los valores relativos a la segunda vía añadida. Como podrá suponer el lector, se puede afirmar de antemano que las tensiones de ambas catenarias coincidirán en los PPS (a tenor de la caída acontecida en los cables de conexión). Respecto a la evolución de la tensión a lo largo de cada hilo, se puede adelantar lo siguiente: aquel de la vía vacía decrecerá linealmente, aumentando su pendiente según el tren se acerque al próximo PPS; por otra parte en la vía empleada se dará un fenómeno más complejo, en el que la tensión caerá hasta encontrarse al tren para recuperarse parcialmente hasta el PPS siguiente. Esta recuperación de tensión nunca será completa entre dos PPS, quedando precisamente establecida por la transmisión equivalente entre las dos vías existentes.

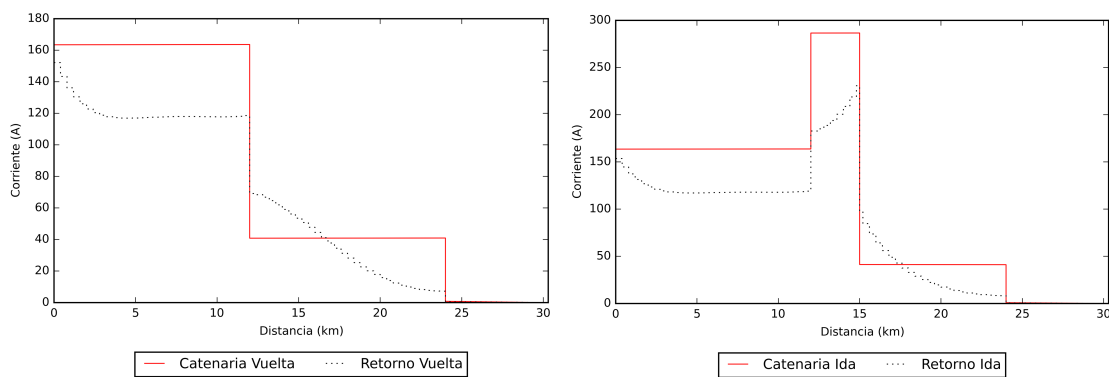


**Figura 6.11** Perfil de tensiones resultante del tercer caso de estudio. Elaboración propia.



De esta manera queda reflejado lo descrito en el perfil de tensiones arrojado por la herramienta, tal y como era de esperar. La tensión de contacto con esta configuración resulta ser alrededor de 0'982, sensiblemente mayor que la anterior, de 0'97 pu, que equivale a 300V de diferencia. El vídeo de la evolución de la tensión muestra que el mínimo absoluto en este caso resulta ser de 0'973 pu, que ciertamente contrasta con los 0'92 pu de la anterior configuración.

Por último, adelantar el aspecto de la distribución de corrientes sí que va a ser más complejo. A priori, se puede decir que a no ser que el tren se ubique en contacto con el PPS, la corriente circulante por la vía en uso siempre será mayor que aquella transitante por la catenaria en desuso, sólo cambiando su valor debido a la presencia de PPS y trenes. Respecto a la corriente circulante por los conductores tierra, se puede presumir que se volverán a producir picos en la misma coincidiendo con la SE y el tren debido a la imposición eléctrica procedente. Habrá que añadir el salto que introducen en la misma los PPS, que no producirán ningún pico debido a que tampoco tienen asociada una imposición eléctrica.



**Figura 6.12** Distribución de corrientes resultante del tercer caso de estudio. Elaboración propia.

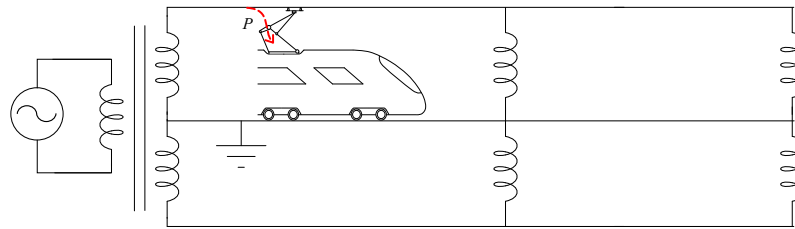
Tal y como muestra la figura generada, el comportamiento predicho coincide con el obtenido: desde la SE fluye la corriente en orden similar a través de cada catenaria, pero al llegar el primer PPS parte de la intensidad circulante por la vía desocupada se redirige hacia aquella en uso, mientras que el resto continúa por los mismos hilos (las proporciones corresponden a aquella que dicte el divisor de corrientes oportuno), hasta que se inyecta completamente en la primera vía en el segundo PPS. En lo que respecta a la corriente de retorno, ésta tiene su origen en el kilómetro 15 de la primera vía debido a la presencia del tren, y al igual que sucedía en los escenarios anteriores parte de la misma se va hacia la izquierda y parte hacia la derecha. La diferencia en esta ocasión reside en que la misma partición se produce cuando parte de la corriente de retorno se redirige a la vía desocupada, fluyendo una fracción de la misma hacia la izquierda y el resto hacia la derecha. Mientras que la presencia de la SE y el convoy sí que producen un pico debido a la imposición eléctrica que ejercen (toda la corriente de retorno se ve forzada a fluir a través de un mismo conductor), ello no sucede debido a la instalación de un PPS.

Así pues, este ha sido el último escenario a  $1 \times 25$  a considerar, ya que además de que el resultado de las configuraciones que quedarían por tratar (varios trenes en tránsito) bien

se pueden obtener aplicando sin gran dificultad el teorema de la superposición a lo ya visto, es un sistema ya en decadencia y desuso, por lo que no se considera adecuado dedicar más líneas a la misma. Este ejercicio sí que se realizará en el caso  $2 \times 25$  debido al aumento cualitativo en el interés despertado que supone la intervención de los AT.

#### 6.1.4 Tren a Tracción en Vía Única a $2 \times 25$

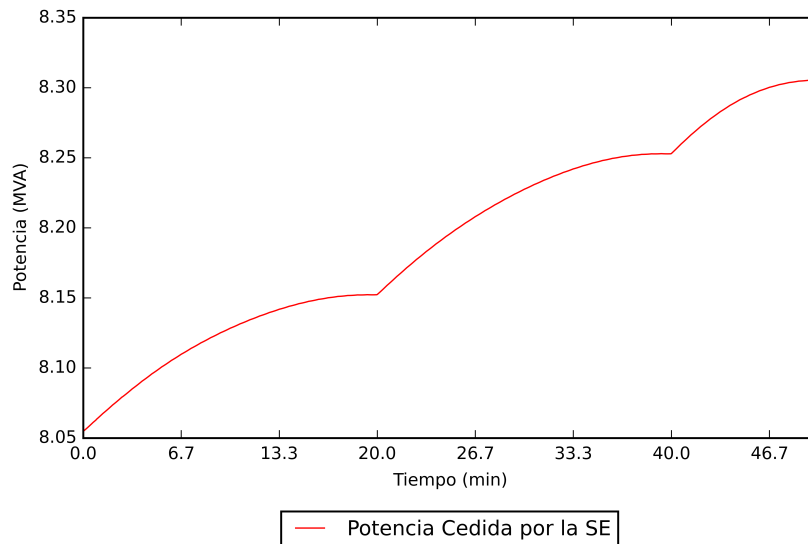
Así pues se pasa a considerar el escenario más posible dentro de la configuración  $2 \times 25$ , aquella en la que sólo hay un único tren circulando a tracción a lo largo de una vía independiente. De nuevo se ha planteado el caso de un tren consumiendo 8 MW en un tramo de 30 km dividido en celdas de 400 m, tomando los valores típicos para caracterizar a las máquinas eléctricas participantes, e instalando AT cada 12 km.



**Figura 6.13** Representación del cuarto caso de estudio. Elaboración propia.

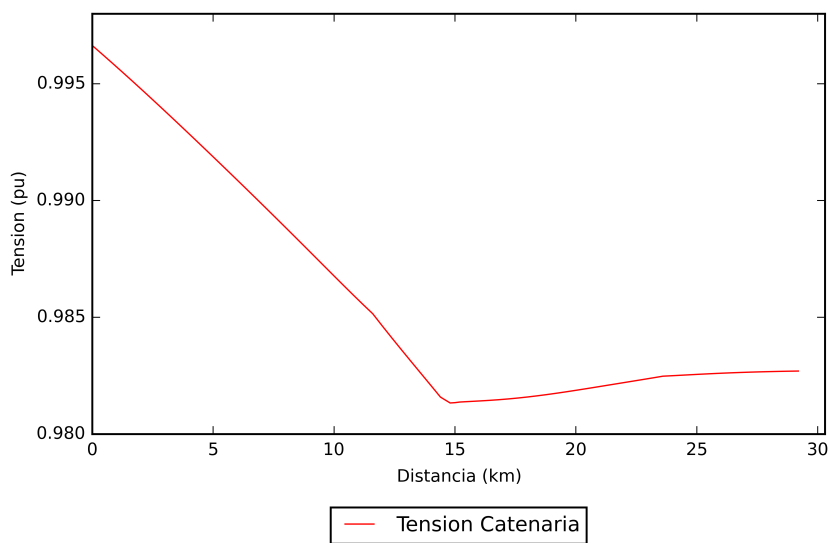
Ahora el discurso cambia radicalmente respecto al del primer escenario considerado, asemejándose de hecho a aquel plasmado en el tercer caso. Como en aquella situación se puede esperar una tendencia general creciente en lo que respecta a la cesión de potencia por parte de la SE, teniendo que considerar esta vez un efecto aún de mayor calado que la existencia de los PPS: la instalación de AT. Como ya sabrá meridianamente el lector, el hecho de emplear este sistema, además de recrear el efecto de redirección de la corriente que se producía en el caso de doble vía del  $1 \times 25$ , llega a duplicar la potencia transmitida para la misma catenaria, o dicho con otras palabras, permite llevar a cabo de manera mucho más eficiente la alimentación de un mismo tren. Así pues, lo que cabe esperar cualitativamente es un resultado similar al obtenido en el escenario anterior, pero con la importante diferencia técnica que en esta ocasión solamente se utiliza un hilo adicional, y no una vía entera.

Tal y como muestra la próxima figura el resultado obtenido es análogo al del caso anterior debido a los motivos expuestos. Los AT ciertamente realizan una labor de inyección análoga a la de los PPS cuando se tiene doble vía, y como el consumo del tren es exactamente el mismo, la curva obtenida es equivalente en forma y muy próxima en valores. Realmente próxima en valores aunque no mejor, pues si bien en el escenario precedente la cesión máxima de potencia no llegaba a los 8'3 MVA, ahora supera ligeramente los mismos.



**Figura 6.14** Curva de consumo resultante del cuarto caso de estudio. Elaboración propia.

En lo que respecta al perfil de tensiones, se espera igualmente una situación análoga al del anterior escenario, con la ausencia de una línea adicional relativa a una segunda vía.

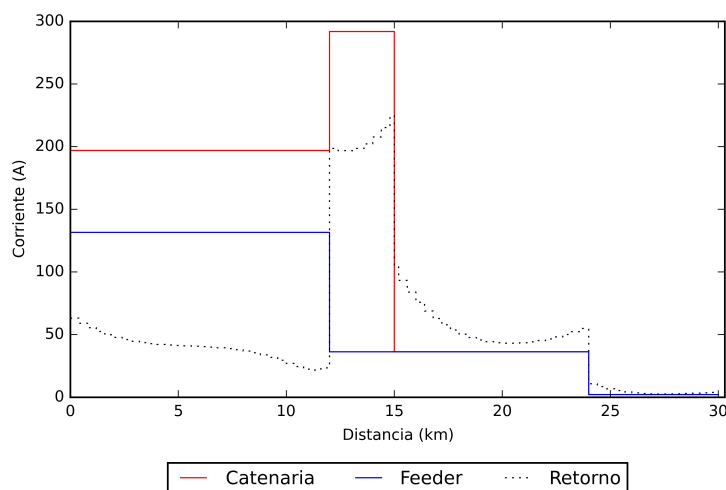


**Figura 6.15** Perfil de tensiones resultante del cuarto caso de estudio. Elaboración propia.

Efectivamente se cumplen las predicciones realizadas, y el perfil de tensiones generado presenta una forma totalmente análoga al del caso anterior. Como era de esperar, una vez vista la cesión de potencia con esta configuración, los resultados que ofrece son ligeramente peores, siendo aproximadamente la tensión de contacto para un tren a 15 km de 0'982 pu, y estando aquella mínima posible alrededor de los 0'968 pu, resultando pues la caída máxima de tensión aproximadamente 800 V.

Por último para este escenario, para la distribución de corrientes habrá que tener en cuenta la existencia ahora de un hilo adicional, el feeder. Al igual que sucedía con tantos aspectos

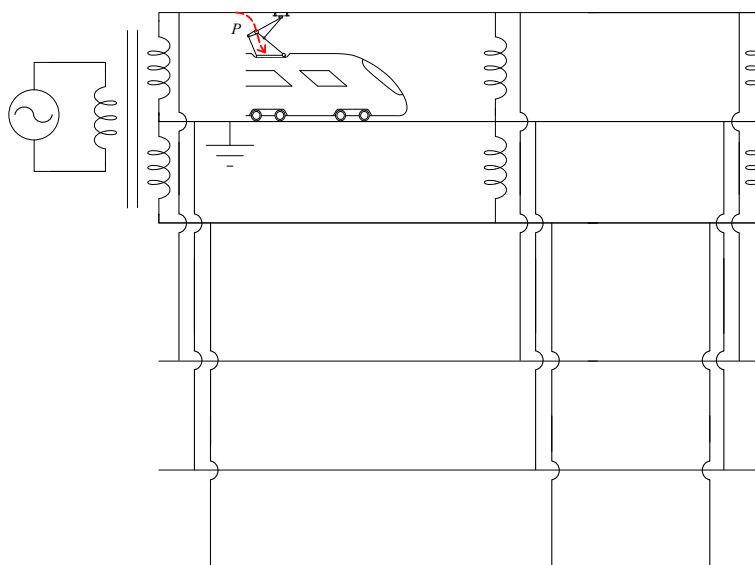
nuevos relativos al sistema  $2 \times 25$ , se puede aventurar que la corriente circulante a lo largo del feeder coincidirá en orden con aquella que transitaba la vía inutilizada, mostrando así la distribución en general un aspecto similar a la del caso anterior. La única diferencia remarcable que se puede esperar es la presencia de picos de corriente circulante por los conductores a tierra, ya que si bien antes el PPS no imponía condición eléctrica alguna respecto al paso de la corriente por ciertos hilos, los AT sí que lo hacen.



**Figura 6.16** Distribución de corrientes resultante del cuarto caso de estudio. Elaboración propia.

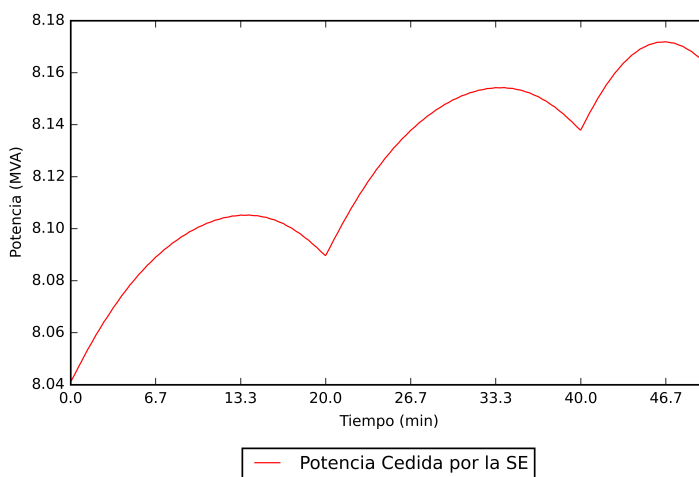
### 6.1.5 Tren a Tracción en Vía Doble a $2 \times 25$

Ahora se considerará la extensión de la misma situación a la doble vía, sin pasar previamente por el caso de frenada, ya que todas las consideraciones y valoraciones del segundo caso (así como igualmente los resultados arrojados) son aplicables también para el  $2 \times 25$ , por lo que no introduce novedad alguna.



**Figura 6.17** Representación del quinto caso de estudio. Elaboración propia.

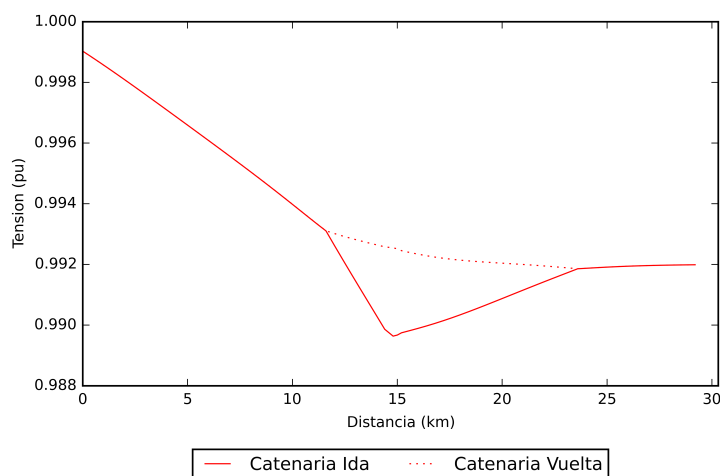
Se puede avanzar que los resultados esperados ahora combinarán las bondades del efecto de la vía adicional con el de la instalación de los AT, lo que supondrá el culmen de la eficiencia de los casos aquí tratados. Ahora la corriente fluirá tanto a través del feeder como por toda la tanda de hilos paralelos, favoreciendo la reducción de la impedancia efectiva. La versión cuantitativa de este curso la facilitará el propio programa.



**Figura 6.18** Curva de consumo resultante del quinto caso de estudio. Elaboración propia.

Se puede observar que ahora la variación del consumo entre puestos de AT es magna, y que incluso el efecto de los mismos llega a reducir la cesión de potencia respecto a los puntos intermedios. Cabe destacar que en este escenario el pico de cesión no se da al final de la línea, que coincide con el último AT, sino pocos kilómetros antes. Así pues, el pico queda fijado alrededor de 8'17 MVA, cantidad sensiblemente menor que los 8'27 MW del caso de doble vía a  $1 \times 25$ .

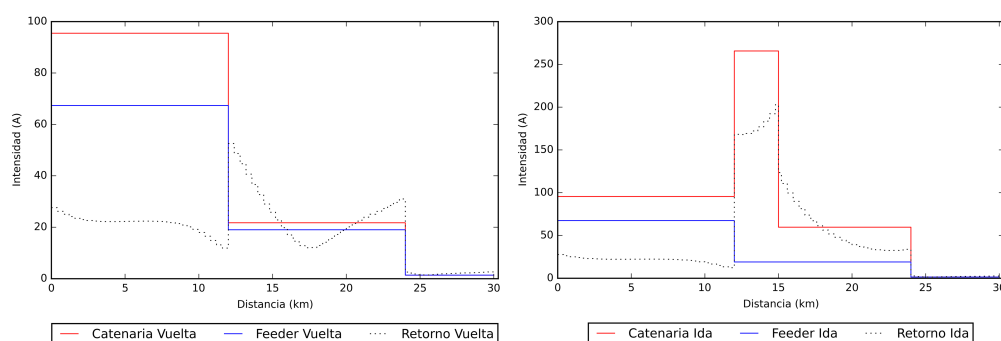
Respecto al perfil de tensiones, no se esperan grandes cambios, en todo caso una recuperación más pronunciada de la tensión hasta el próximo AT, y resultados más eficientes.



**Figura 6.19** Perfil de tensiones resultante del quinto caso de estudio. Elaboración propia.

A la vista está que se cumple lo esperado, mostrando una forma similar al del caso análogo pero con resultados ciertamente mejores. En términos numéricos, ahora la tensión de contacto del pantógrafo ronda los 0'989 pu, valor sensiblemente mayor que los 0'982 pu del caso homólogo a  $1 \times 25$ . Por otra parte, la tensión mínima posible será alrededor de 0'984 pu, más que significativamente superior a la del caso análogo, que era aproximadamente de 0'973 pu.

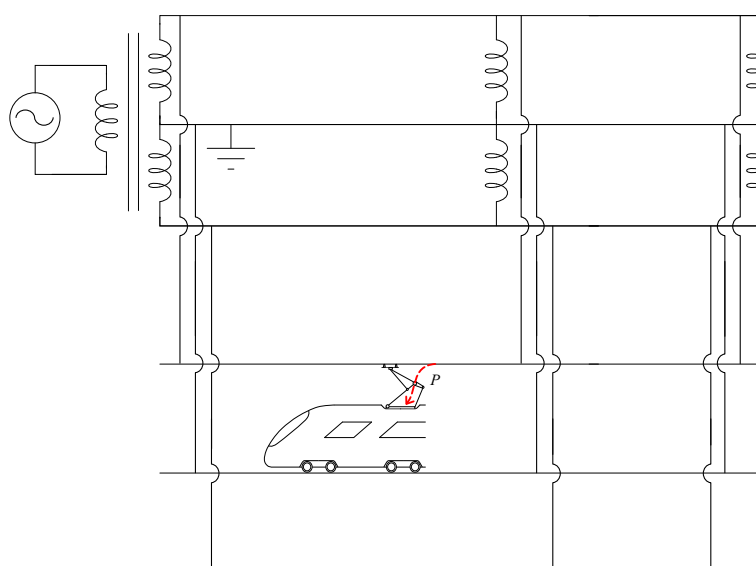
Lo que se espera en lo relativo a la distribución de corrientes es otra vez una combinación del efecto de redirección de la doble vía, con el de la inyección de corriente en la catenaria por parte del feeder a través de los AT.



**Figura 6.20** Distribución de corrientes resultante del quinto caso de estudio. Elaboración propia.

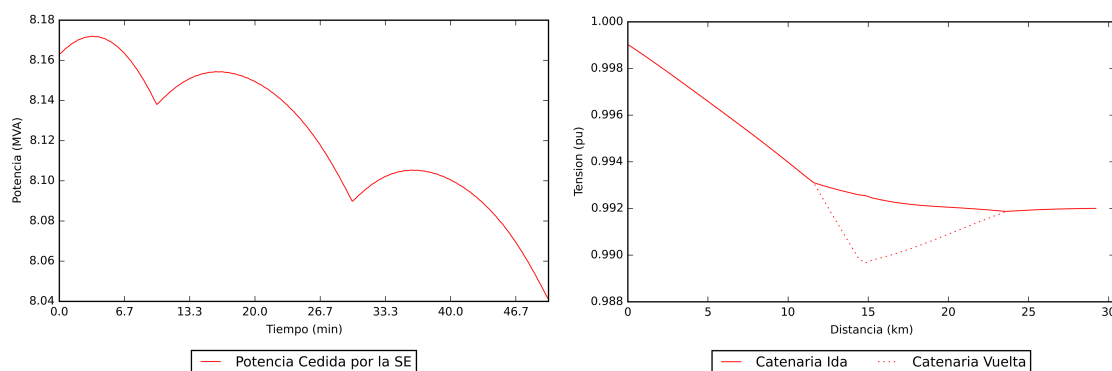
### 6.1.6 Tren de Vuelta a Tracción en Vía Doble a $2 \times 25$

Antes de proceder al estudio del escenario en el que se encuentran trenes en ambas vías, se considera oportuno mostrar los resultados obtenidos relativos al caso en el que solamente circula un tren por la vía de vuelta. El tren empleado es similar en todos los sentidos al tomado en apartados anteriores, manteniendo un consumo constante de 8 MW.

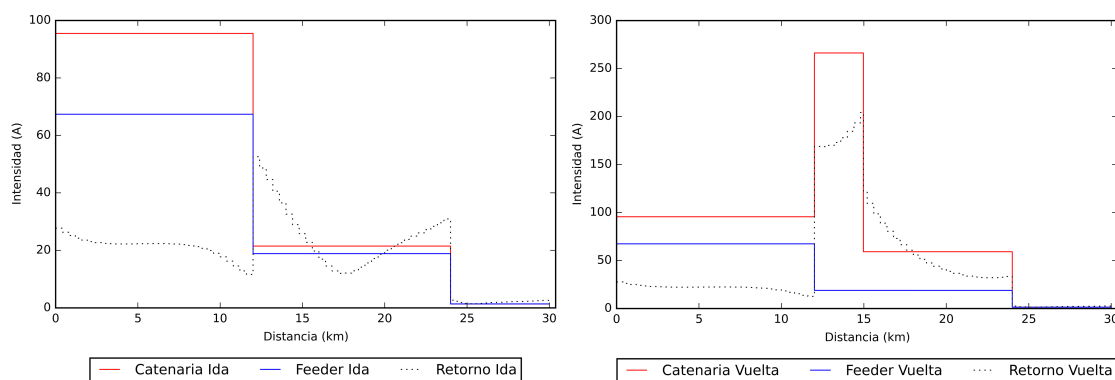


**Figura 6.21** Representación del sexto caso de estudio. Elaboración propia.

Como el lector podrá suponer, los resultados arrojados serán análogos a los obtenidos en el caso anterior, con la diferencia que ahora la gráfica de cesión de potencia estará "invertida" horizontalmente, dándose el pico de cesión justo al penetrar el tren en el tramo, ya que entra por el otro extremo. Lo mismo sucederá con la evolución de la tensión de contacto, que mostrará una transición creciente en el tiempo, según el convoy se acerca a la SE.



**Figura 6.22** Curva de consumo y perfil de tensiones resultantes del sexto caso de estudio. Elaboración propia.



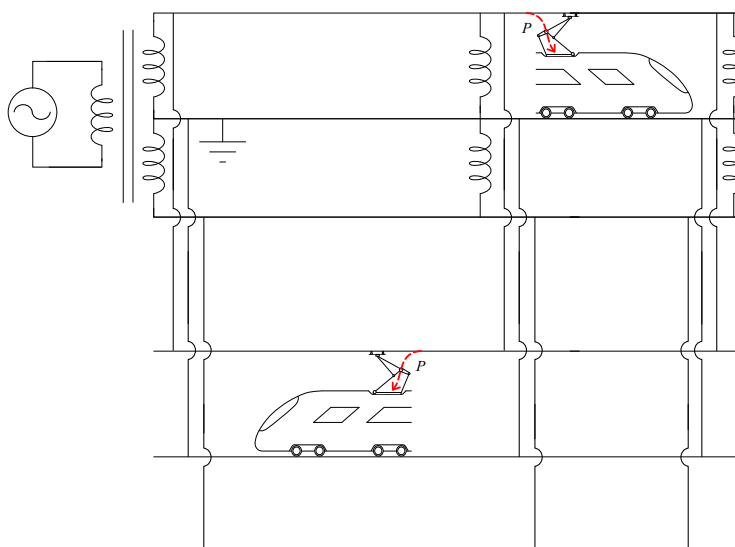
**Figura 6.23** Distribución de corrientes resultante del sexto caso de estudio. Elaboración propia.

Como era de suponer, se confirman las sospechas y los resultados obtenidos son absolutamente análogos a los del escenario anterior, a tenor de las diferencias explicadas previamente.

### 6.1.7 Trenes Simultáneos a Tracción en Vía Doble a 2x25

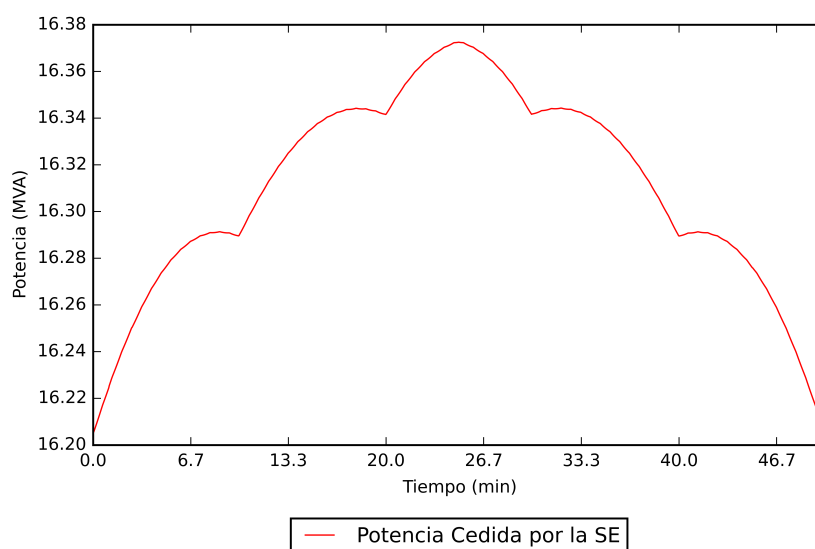
El siguiente escenario a considerar incluye el tanto el tránsito de un tren en sentido de ida como el de otro de vuelta por la vía paralela de manera simultánea. Si bien es una situación casi imposible de ocurrir, se considera oportuno tratar primero este caso tan particular para facilitar el proceso de entendimiento en escenarios posteriores de mayor complejidad. Así pues, en esta ocasión se ha considerado el mismo tramo hasta ahora, con la inclusión de un tren símil en todos los parámetros circulante por la vía paralela, que obviamente penetra

por el otro extremo de la vía a la vez que el otro convoy.



**Figura 6.24** Representación del séptimo caso de estudio. Elaboración propia.

A rasgos generales cabe esperar un rendimiento sensiblemente perjudicado respecto al de doble vía con tránsito de un único convoy, ya que ahora cada catenaria será responsable de portar la corriente para su propio tren. De hecho, elaborando un poco este argumento, se puede adelantar que el único instante en el que cada vía solamente portará la corriente consumida por su propio tren, será aquel en el que ambos se crucen justo en el centro de la vía, ya que en esa situación ambos caminos ofrecerán la misma impedancia al transporte eléctrico. En el resto de casos la catenaria que alimente al tren más cercano seguirá sufriendo una circulación de corriente hasta el AT siguiente al tren de la otra vía, aconteciendo en esa fracción de tramo algo similar a lo que sucedía en el caso de segunda vía inutilizada.



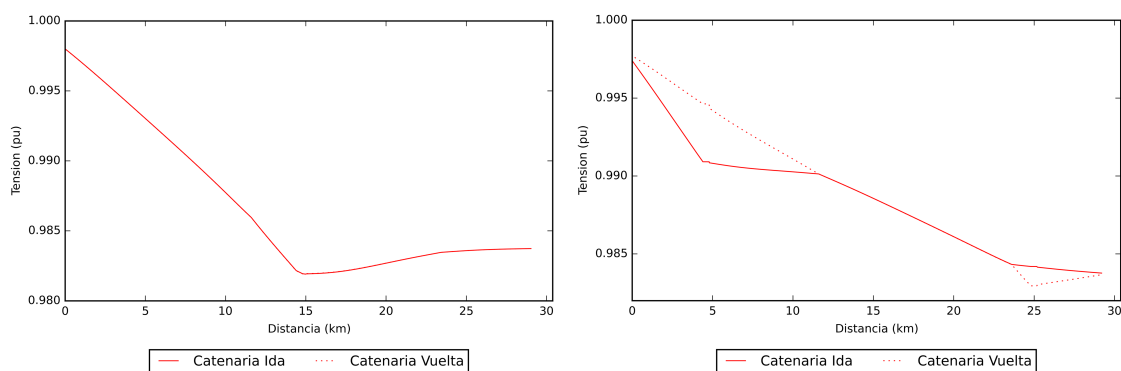
**Figura 6.25** Curva de consumo resultante del séptimo caso de estudio. Elaboración propia.



En lo que respecta al consumo podemos adelantar que en lugar de adoptar una tendencia uniforme, mostrará una forma simétrica, existiendo un pico absoluto de cesión de potencia, que coincidirá en esta ocasión con el momento en el que ambos trenes se cruzan a mitad de la vía (no sería así si no entraran en el tramo a la vez). En el tramo empleado en este y el resto de escenarios se ha tomado adrede una longitud total no proporcional a la distancia entre AT, siendo así el último subtramo sea más pequeño que el resto, razón por la cual se verá que la curva de cesión de potencia presenta cinco "rizos" en lugar de tres.

De la manera que muestra la figura anterior se plasma en los resultados que la curva resultante poco tiene que ver con aquella relativa a los escenarios anteriores, teniendo en esta ocasión la forma simétrica previamente predicha. Ahora la cesión mínima de potencia resulta ser de aproximadamente 16'21 MVA, que coincide con la superposición de los valores de consumo del principio y fin del tramo de las curvas independientes de ambos trenes (8'04 y 8'16 MVA), lo cual era previsible, ya que en ese instante una de las catenarias está completamente libre para alimentar al tren de la vía paralela. Por otro lado, la cesión de potencia máxima ronda los 16'37 MVA, que sí que es superior a la suma de los valores de cesión pertinentes justo a mitad de la vía (aproximadamente 8'13 MVA) precisamente debido a la no completa disponibilidad de la segunda vía para alimentar al tren circulante, como ocurría en escenarios anteriores. Esta es la ligera pérdida de eficiencia a la que se hacía referencia antes de mostrar los resultados.

Como ya viene siendo habitual, el perfil de tensiones mostrará un comportamiento similar en concepto a la curva de cesión de potencia. Así pues, se espera que hasta el AT precedente a los trenes ambas catenarias compartan la evolución de la tensión, para ya adoptar una forma u otra según la posición de los convoyes dentro del subtramo de cada vía. Se presume que si ambos trenes se ubican justo en el medio de la vía, el perfil de tensiones de ambas catenarias será el mismo para ambas vías.

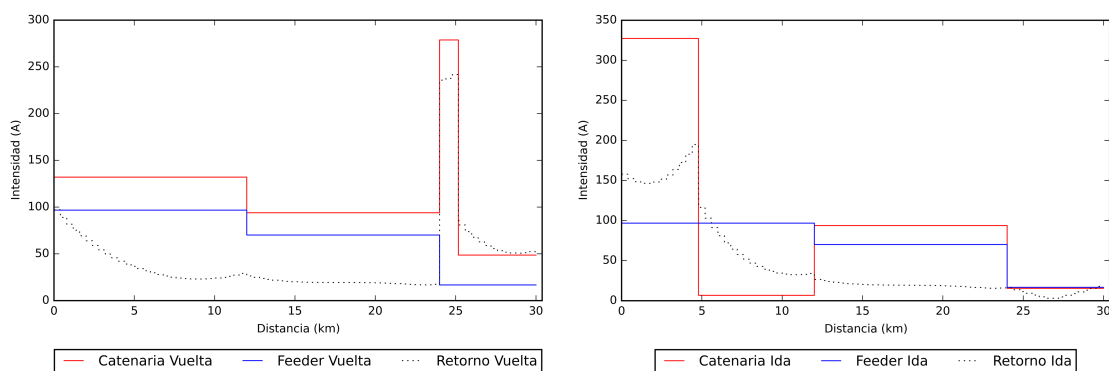


**Figura 6.26** Perfiles de tensiones resultantes del séptimo caso de estudio para dos instantes diferentes. Elaboración propia.

Efectivamente se cumplen las previsiones, tal y como muestran las figuras para dos instantes diferentes a lo largo de la simulación. Como era de esperar la caída de tensión es superior al escenario donde la segunda vía está desocupada, pasando de tener 0'989 pu a aproximadamente 0'982 pu, conllevando una caída significativa de la misma. En cuanto a tensiones mínimas de contacto, para ambas vías se cumple que el valor ronda los 0'98 pu, que toma lugar cuando el tren de la vía opuesta pasa justo por el primer AT del tramo.

Recuerde que para el caso de una vía inutilizada la tensión mínima de contacto 0'984 pu.

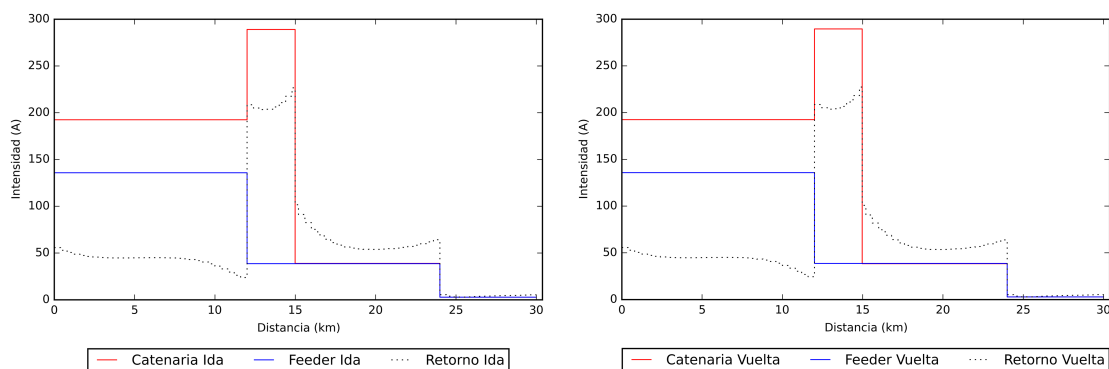
Por otra parte, las distribuciones de corriente respectivas deberán reflejar tanto la intensidad de alimentación del propio tren como la del de la vía paralela, produciéndose así una superposición de las distribuciones ya vistas. Así pues, una vez cada catenaria haya portado la corriente necesaria para alimentar a su propio convoy, continuará transmitiendo cierta cantidad de intensidad, que a través de los AT y PPS terminará contribuyendo a la alimentación del segundo tren, disminuyendo así la impedancia equivalente vista por el segundo convoy.



**Figura 6.27** Distribución de corrientes resultante del séptimo caso de estudio. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos hacen referencia a una situación en la que se encuentra un tren de vuelta a los 25 km y otro de ida a los 5 km. Muestran cuantitativamente cómo se lleva a cabo el fenómeno de alimentación y redirección descrito previamente, y a la vista está que presenta una distribución mucho más compleja que en escenarios anteriores, lo que no es de extrañar debido a la cantidad de fenómenos superpuestos.

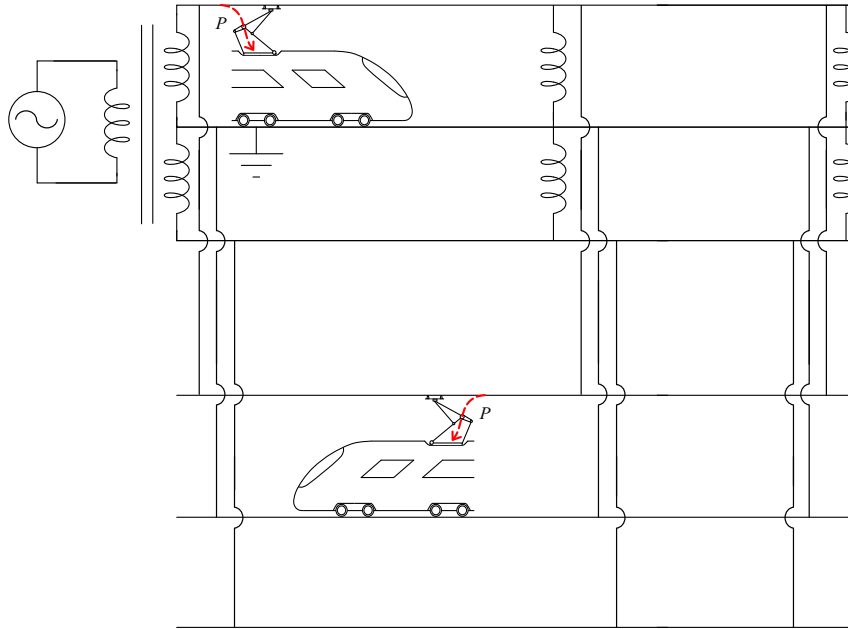
Se ha considerado igualmente oportuno incluir el caso concreto en el que ambos trenes se cruzan justo en la mitad de la vía, para dejar patente que efectivamente las distribuciones resultan iguales en ambas vía.



**Figura 6.28** Distribución de corrientes resultante del séptimo caso de estudio cuando ambos trenes se encuentran en la mitad del tramo. Elaboración propia.

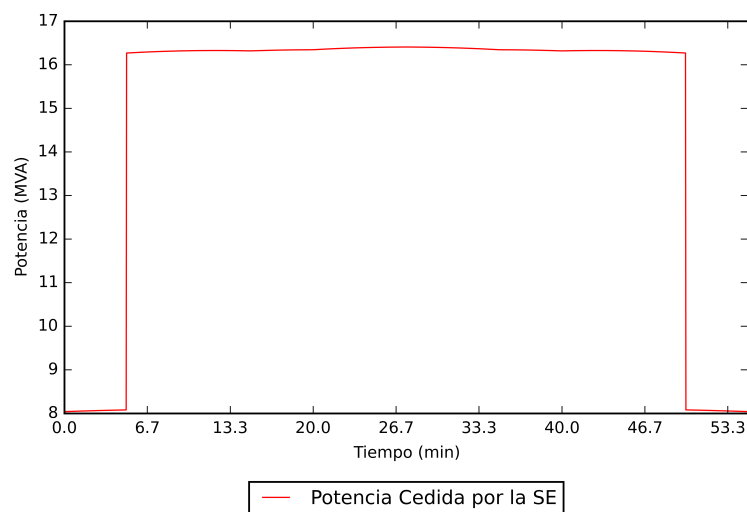
### 6.1.8 Trenes No Simultáneos a Tracción en Vía Doble a 2x25

A continuación se hace un breve repaso al escenario en el que hay trenes en ambas vías, al igual que antes, con la diferencia de que estos no penetran a la vez en el tramo considerado, lo que implicará cambios notables en la forma general de los perfiles obtenidos.

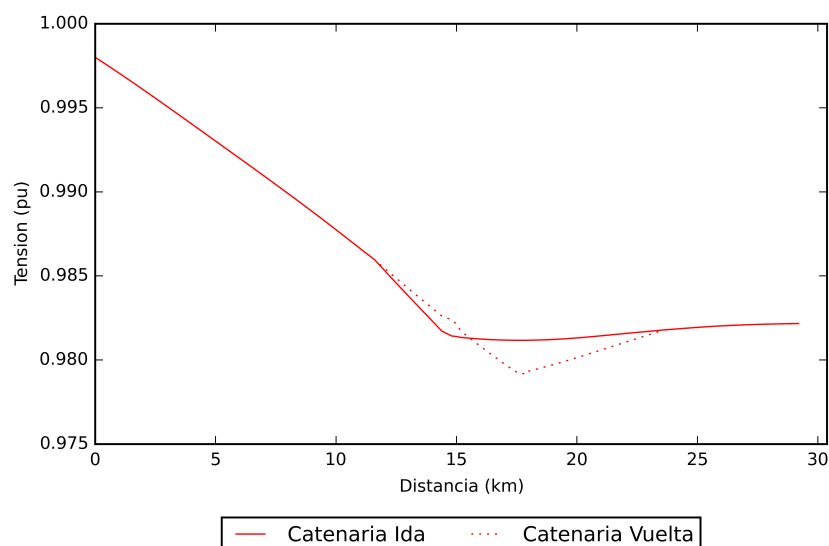


**Figura 6.29** Representación del octavo caso de estudio. Elaboración propia.

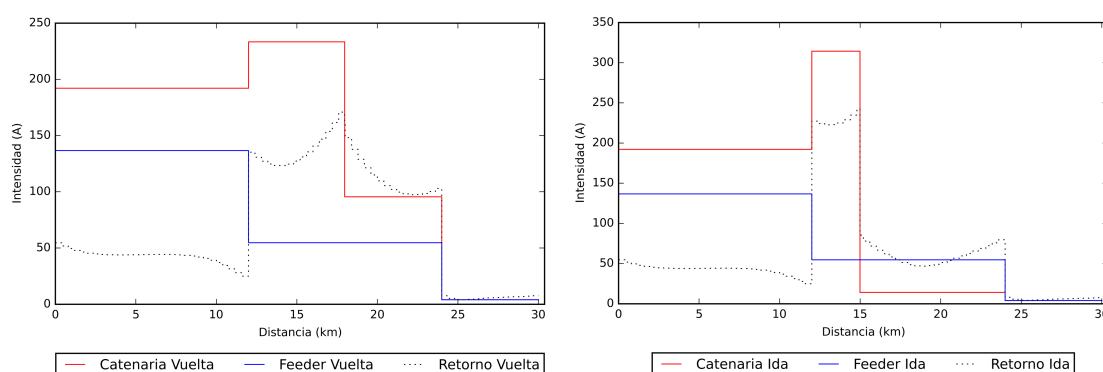
Lo que cabe esperar es un comportamiento mixto: en aquellos instantes en los que sólo haya un tren se dará el comportamiento ya visto de vía adicional con un único convoy, mientras que en aquellos con dos trenes se podrán aplicar las particularidades mencionadas en el escenario anterior, fruto del doble tránsito ferroviario.



**Figura 6.30** Curva de consumo resultante del octavo caso de estudio. Elaboración propia.



**Figura 6.31** Perfil de tensiones resultante del octavo caso de estudio. Elaboración propia.



**Figura 6.32** Distribución de corrientes resultante del octavo caso de estudio. Elaboración propia.

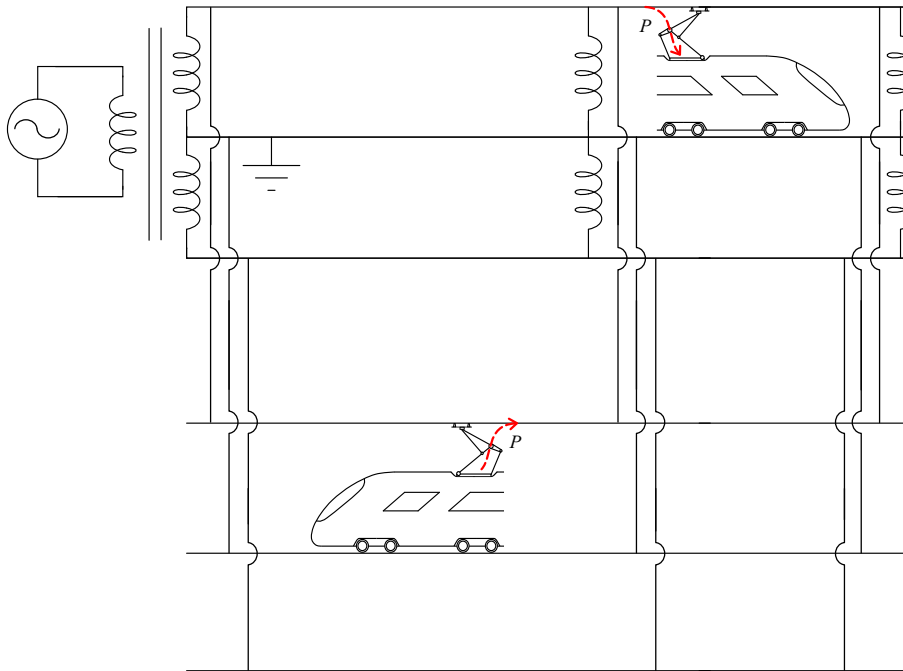
Tal y como muestran los resultados arrojados, los primeros cinco minutos la cesión de potencia por parte de la SE ronda los 8 MVA, pero al entrar el segundo tren se dispara hasta duplicar su valor, como ya era predecible. De manera análoga, la cesión cae repentinamente al abandonar el primer tren el tramo, y solamente quedar aquel que entró más tarde. En esta situación se evidencia realmente lo poco significativo que resulta la variación inducida por los aún existentes "rizos" en comparación con el consumo nominal de los trenes.

Un documento muy descriptivo en esta situación es el vídeo de la evolución de tensiones, que muestra cómo ésta se reduce súbitamente al penetrar en el tramo el segundo convoy, pasando de un instante a otro de los, en este caso, 0'996 pu a los 0'993 pu.

Igualmente la distribución de corrientes acaecida muestra cómo se repite el efecto del escenario anterior: en la catenaria del tren más cercano continúa circulando un poco de intensidad una vez alimentado al convoy que transita en ella, que más tarde se inyecta en la otra vía, para, junto a la corriente transportada por los feeder, alimentar al tren más lejano por ambas partes.

### 6.1.9 Trenes Simultáneos a Tracción y Frenada en Vía Doble a 2x25

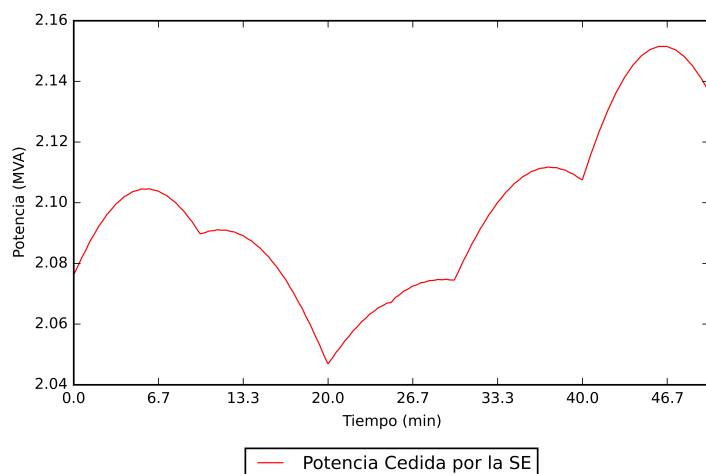
Finalmente se plantea el escenario más curioso de todos según el criterio del autor, que es aquel en el que dos trenes penetran a la vez en un tramo desde los extremos opuestos, uno inyectando y otro consumiendo potencia. En esta ocasión, en lugar de considerar un tren inyectando 8 MW a la catenaria, como bien se hizo en el escenario correspondiente a  $1 \times 25$ , se tomará una cesión de potencia de 6 MW, que además de ser más realista, va a enfatizar la cantidad de corriente que tenga que aportar la SE al tren en tracción.



**Figura 6.33** Representación del noveno caso de estudio. Elaboración propia.

Se puede suponer que en esta ocasión se va a recrear una situación similar a aquella ya vista de alimentación doble a CC. El tren en frenada hará las veces de SE, inyectando corriente en la catenaria y cediendo 6 MW, por lo que desde su pantógrafo hasta el del convoy en tracción circulará la intensidad generada gracias a la frenada regenerativa, que reducirá contundentemente la cesión de potencia llevada a cabo por la SE del tramo. A esta analogía habrá que sumarle el hecho de que el tren en frenada se va moviendo, por lo que a primeras será definir con certeza qué aspecto tendrá la curva de cesión de potencia por parte de la SE.

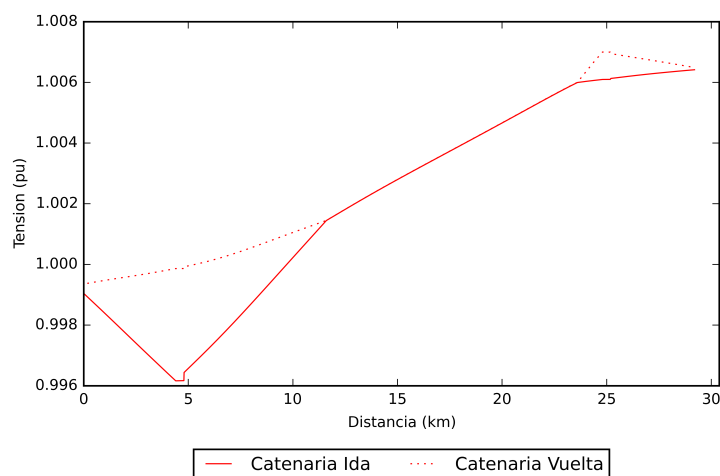
Lo que sí que se puede afirmar es que habrá un mínimo cercano a los 2 MW, y que su forma general se asemejará a la de una "U" con el lado derecho más elevado que el izquierdo, ya que si bien al comienzo de la simulación el tren a tracción está cerca de la SE y lejos del convoy en frenada (produciéndose cuantiosas pérdidas sólo relativas a la potencia inyectada por el tren), alrededor del final de la misma estará lejos tanto de una como de otra (acaeciendo pérdidas relativas tanto a la SE como al tren en frenada).



**Figura 6.34** Curva de consumo resultante del noveno caso de estudio. Elaboración propia.

Como se puede observar en la curva adjunta a continuación, poco hay en común con aquellas vistas hasta ahora, que presentaban cierta belleza y una marcada simetría. Lo que sí que se mantiene igualmente son los cinco rizos, aunque bien la forma de cada uno será diferente a los siguientes motivos: al principio el tren a tracción se encuentra cerca de la SE mientras aquel frenando lejos de la misma, por lo que la alimentación desde la red se ve favorecida; según se van acercando los convoyes las contribuciones se van equilibrando, alcanzando su máxima equivalencia cuando ambos trenes circulan por el tramo central. Finalmente, según el convoy a tracción se aleja, la distancia hasta las dos fuentes se hace máxima, por lo que la cesión de potencia por parte de la SE se maximiza igualmente.

Igualmente se confirma el orden de los valores de cesión en la SE, yendo desde 2'04 MVA hasta 2'15 MVA en el peor de los casos. Si el tren a frenada hubiera inyectado una potencia diferente, un comportamiento similar se habría producido, teniendo como mínimo de cesión en dicha ocasión un valor ligeramente superior a la diferencia entre el consumo a tracción y la inyección en frenada.

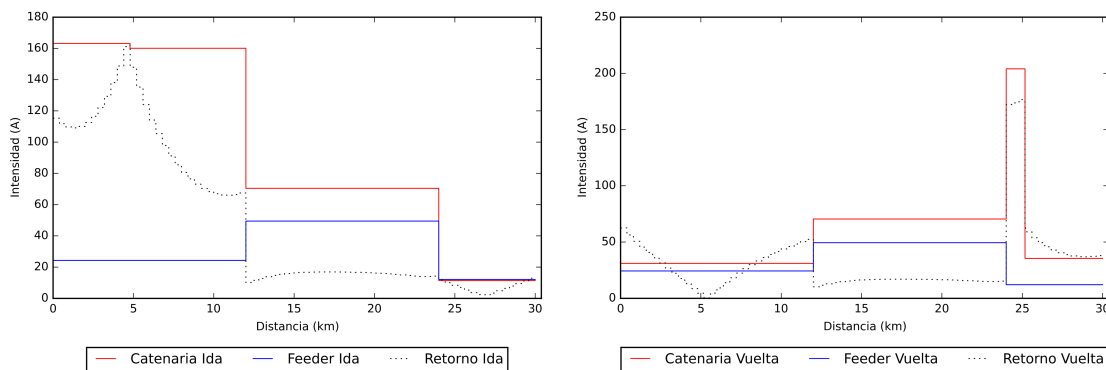


**Figura 6.35** Perfil de tensiones resultante del noveno caso de estudio. Elaboración propia.

En lo que respecta al perfil de tensiones, se puede decir que éste presentará una pendiente positiva o negativa, o ambas, según la posición relativa entre ambos trenes. Si el tren a tracción se ubica entre aquel en frenada y la propia SE, probablemente el perfil adopte una forma de valle, teniendo el mínimo en aquel punto donde se encuentra el convoy a tracción. De esta manera, cuanto más cerca de la SE esté el primer tren, menos pronunciada será dicha forma de valle. Si por otra parte, el tren a tracción se encuentra más adelante que aquel inyectando potencia, el perfil de tensiones presentará una pendiente positiva.

La situación escenificada por el perfil mostrado arriba es aquella en la que el tren en frenada se encuentra después de aquel a tracción, por lo que se presenta la mencionada forma de valle. Igualmente observable es el tan bondadoso impacto que tiene la presencia del tren en frenada en términos de tensión de contacto, que queda relegada a los 0'996 pu, valor ciertamente alto en comparación al resto de escenarios.

En cuanto a la distribución de corrientes, no se espera ningún fenómeno en especial que no se haya visto ya en casos anteriores, salvo al detalle que ahora la cantidad de corriente que le llega al tren por la derecha será mucho mayor que en el resto de escenarios ya vistos, por todas las razones expuestas previamente. Cabe decir que debido a que la potencia inyectada no supera a la consumida, no se realizará ningún trasvase positivo de potencia a la red, como sí que ocurría en la sola presencia del tren a frenada.



**Figura 6.36** Distribución de corrientes resultante del noveno caso de estudio. Elaboración propia.

## 6.2 Análisis de los Resultados

Tras llevar a cabo el exhaustivo repaso a los resultados arrojados por los principales escenarios posibles, se está en condiciones de valorar qué configuración es aquella en primera instancia más interesante. Para ello se hará un resumen de los valores obtenidos en cada escenario a nivel de consumo de potencia y tensión de contacto, para así enfrentar en comparación directa cada configuración,  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$ .

Tras ello se procederá a realizar un proceso muy importante: la valoración de la veracidad de los valores obtenidos. Para ello se emplearán los instrumentos teóricos ya mostrados a lo largo del presente documento, ya sea en forma de gráfica de caída de tensión para cada configuración o según la distribución de corrientes resultantes y la impedancia de los transformadores empleados.

### 6.2.1 Comparación de las Configuraciones Posibles

Así pues, en la tabla adjunta a continuación se incluyen de manera concisa los valores resultantes en aquellos escenarios comparables. Se hace la precisión de "comparables" porque carece de sentido enfrentar los resultados en términos de consumo, por ejemplo, de una vía que alimenta a un convoy con otra que abastece a dos. Así pues, para hacer un juicio lo más justo y cercano a las configuraciones reales posible, sólo se tendrán en cuenta los escenarios de vía única y doble circuladas por un único tren, es decir, el primero, tercero, cuarto y quinto de los casos del análisis anterior.

Los parámetros considerados como determinantes serán pico de cesión de potencia, energía total cedida, y tensión mínima de contacto. Para hacer la comparación entre los diferentes sistemas se incluyen dos tablas: en la primera, para que la diferencia entre las configuraciones sea más visual se ha decidido expresar todo en por unidad respecto a los resultados del primer escenario, mientras que en la segunda se han dejado los parámetros en bruto a fin de conocer también su valor cuantitativo:

**Tabla 6.1** Resultados en pu relativos a los diferentes escenarios considerados. Elaboración Propia.

	1 × 25 Vía Única	1 × 25 Vía Doble	2 × 25 Vía Única	2 × 25 Vía Doble
Pico de Potencia	1	0'964	0'967	0'951
Energía Cedida	1	0'990	0'991	0'984
Tensión Mínima	1	1'033	1'033	1'051
Caída Máxima de Tensión	1	0'515	0'515	0'25

**Tabla 6.2** Resultados con sus valores en bruto. Elaboración Propia.

	1 × 25 Vía Única	1 × 25 Vía Doble	2 × 25 Vía Única	2 × 25 Vía Doble
Pico de Potencia (MVA)	8'59	8'28	8'31	8'17
Energía Cedida (GJ)	24'59	24'34	24'37	24'20
Tensión Mínima (pu)	0'936	0'967	0'967	0'984
Caída Máxima de Tensión (pu)	0'064	0'033	0'033	0'016

A la vista está que la tendencia es de mejora según la configuración empleada se hace más compleja, partiendo desde el caso más simple posible, alimentado a 1×25 con vía única, hasta el más completo de todos, 2×25 y vía doble. Empleando como criterio único el rendimiento eléctrico sin lugar a dudas el método preferido será el último, quedando en



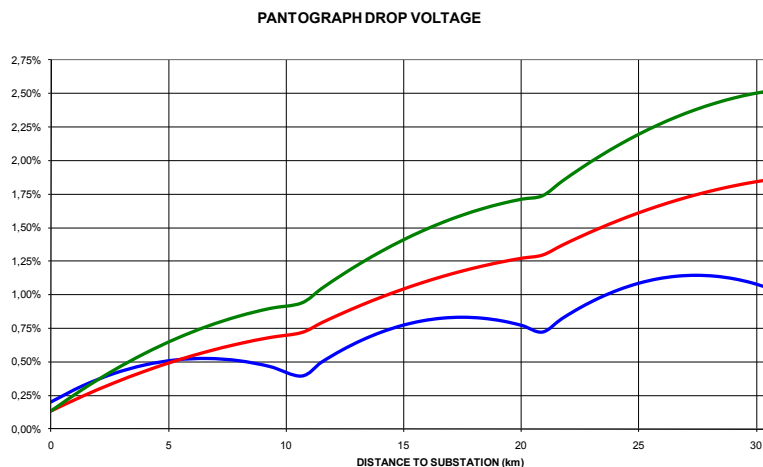
segundo lugar aquel de  $1 \times 25$  y doble vía, ya que ofrece mejores resultados que el sistema de vía única con feeder. Eso sí, si el criterio empleado fuera la adecuación general al proyecto (sin profundizar en la rentabilidad económica), son las configuraciones a  $2 \times 25$  las opciones preferidas sin discusión alguna, ya que los resultados que arrojan en los escenarios de vía única y doble siempre son mejores que cuando se emplea el  $1 \times 25$ . Dicho de otra manera, para un proyecto de vía única carecería de sentido utilizar un sistema de  $1 \times 25$  con doble vía en lugar de una configuración a  $2 \times 25$  con vía única, simplemente para mejorar ligeramente la eficiencia del sistema.

Esto pone en relieve el discurso que se ha ido realizando a lo largo de todo el documento, cuyo mensaje principal es la conveniencia de la configuración a  $2 \times 25$  frente aquella a  $1 \times 25$ . Así pues, de esta manera se ha encontrado la primera aplicación práctica de la herramienta desarrollada: cuantificar las mejoras introducidas al pasar de un sistema a otro.

Una vez se tienen los resultados en mano se procede a emplear los diferentes instrumentos disponibles para valorar la veracidad, y por ende fidelidad, de la herramienta que ocupa este trabajo.

### 6.2.2 Caídas de Tensión

En primer lugar se va a recurrir, como ya fue mencionado, a la caída de tensión porcentual que debería acaer en cada caso según el análisis llevado a cabo por Ineco [10], que se considera una fuente fiable. Antes de proceder a juzgar la veracidad de los resultados, se adjunta la gráfica a la que se hace referencia:



**Figura 6.37** Comparación de la caída de tensión desde la SE al pantógrafo en tres configuraciones diferentes: línea verde  $1 \times 25$ , línea roja  $1 \times 25$  de doble sección de hilo, y línea azul  $2 \times 25$ . Fuente [10].

Así pues, gráficas en mano, se observa que la caída máxima de tensión en un tramo de algo más de 30 km debería resultar del 2'5 % para el  $1 \times 25$  y del 1 % para el  $2 \times 25$ . Pero ¿Qué datos emplear para hacer la comprobación? Como ya sabrá el lector, para que la configuración a  $1 \times 25$  presente los ya vistos "rizos" es necesario que haya una segunda vía, así que sin lugar a duda se deben tomar aquellos resultados relativos a los escenarios de doble vía.

Comparando los resultados se evidencia que en lugar del 2'5 % de caída de tensión para el 1×25 la herramienta indica un 3'3 %, y que para el 2×25 en vez de una caída del 1 % arroja una del 1'2 %. Lo primero que cabe destacar es que los órdenes de magnitud son bien similares, en especial en el segundo caso, donde la diferencia entre resultados es muy reducida, lo cual en primera instancia es motivo de calma e indicador de la bondad de los resultados obtenidos. Igualmente es una razón para confiar en los valores arrojados por el código el hecho de que las curvas de cesión de potencia muestren la misma tendencia y forma que las curvas de caída de tensión facilitadas por Ineco, ya que ambas están íntimamente ligadas.

En cualquier caso, uno no se puede dar por satisfecho simplemente sabiendo que los órdenes son similares, pues hay que justificar a qué se debe la diferencia existente entre unos resultados y otros. Así pues ¿A qué se puede deber? Como no podía ser de otra manera, a múltiples factores diferentes, ya que tal y como habrá comprobado el lector las variables que condicionan el perfil de tensiones son más que numerosos, y si no fuera así la utilidad del presente trabajo sería nula. Sólo por poner un ejemplo, el mero hecho de considerar un tren que consumiera una mayor potencia, implicaría un aumento de la caída más pronunciado, discurso igualmente válido para la utilización de una catenaria de hilos más cercanos, o para el modelado de las conexiones auxiliares mediante impedancias de mayor valor.

Así pues, debido a que en el informe de Ineco no se indica el origen de dicha gráfica (por lo que no se puede entrar a valorar el método de obtención de la misma), a que las curvas de caída de tensión empleadas muestran un aspecto igual a aquellas de cesión de potencia obtenidas con *RST*, y a que tal y como ha sido puesto en relieve, la caída de tensión depende de una amplia terna de parámetros de valor muy variable, el hecho de que ambos órdenes sean similares bien se considera un triunfo en términos de veracidad.

### 6.2.3 Distribución de Corrientes en el 2x25

El segundo instrumento a emplear, igualmente ya visto en este documento, es considerablemente más elaborado que el anterior, pues proviene de todo un estudio teórico-práctico desarrollado por miembros del Politecnico di Milan [12], como ya fue introducido previamente en el documento. Este instrumento no es otro que una serie de gráficas que relacionan los parámetros  $\alpha$  y  $\gamma$  (que, recuerde, parametrizan la distribución de corrientes en el 2×25) con la impedancia de cortocircuito de los AT empleados y otros tantos parámetros.

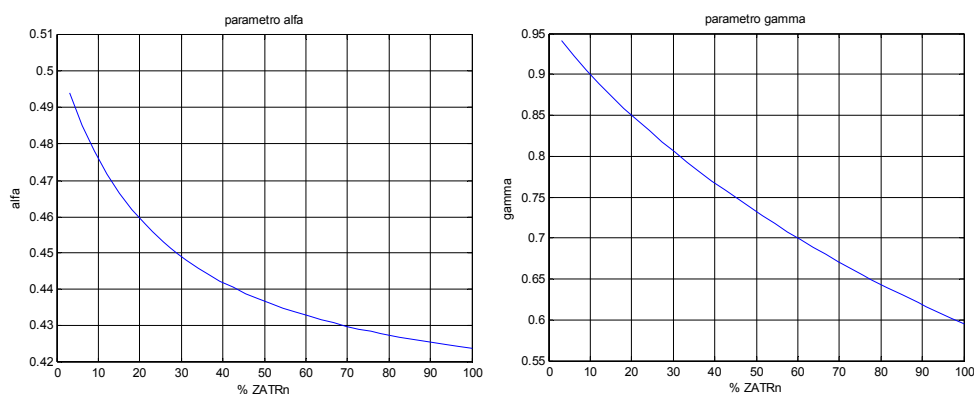


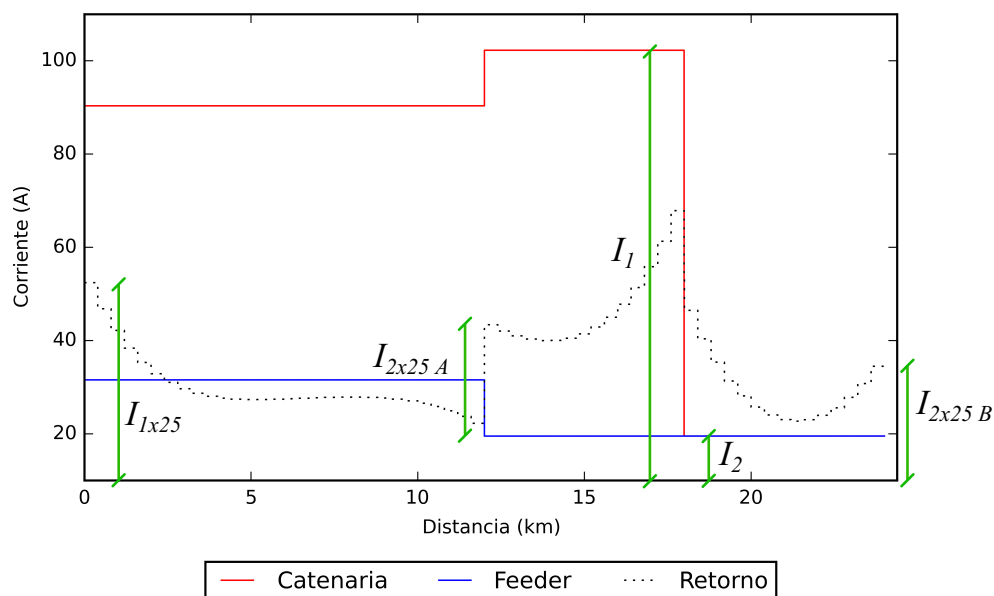
Figura 6.38 Relación  $\varepsilon_{CC} - \alpha$  y  $\varepsilon_{CC} - \gamma$ . Fuente: [12].

Antes de proceder a la obtención y contrastación de los resultados es necesario evaluar las limitaciones del presente proceso de comparación, pues ello indicará hasta qué punto se puede tolerar una diferencia entre los comportamientos resultantes. Como podrá suponer el lector, la distribución de corrientes no puede depender únicamente de un parámetro como la impedancia de CC de los AT, de hecho en el propio artículo se muestra también la dependencia de  $\alpha$  y  $\gamma$  con la altura del feeder y la posición del tren entre dos AT. En cualquier caso  $\alpha$  y  $\gamma$  dependerán también de muchos otros factores, como es la impedancia de los raíles, la del feeder y catenaria, características de las toma de tierra... Es decir, que las incógnitas son muchas, tal es así que en el artículo no se menciona en qué grado de similitud se han contrastado los resultados con la realidad, ni tampoco bajo qué condiciones.

Por los motivos expuestos anteriormente, se considerará un rango de incertidumbre ciertamente amplio, tomando así la veracidad de la herramienta como oportuna en el caso de que los órdenes y tendencias de los datos sean similares dentro de un contexto acotado.

Para emplear esta relación como instrumento verificador se llevarán a cabo múltiples simulaciones de un mismo convoy ubicado en el kilómetro 18 de un tramo de 24 km, dividido en celdas de 400 m, con AT de impedancia variable instalados cada 12 km. Así pues, fijándose siempre en la distribución acontecida, se espera poder realizar la comparación oportuna y poder construir una evolución similar a la curva teórica.

Las únicas variables necesarias para obtener los parámetros en juego son  $I_{1x25}$ ,  $I_{2x25 A}$ ,  $I_{2x25 B}$  e  $I$ , siendo respectivamente la corriente que retorna a la toma media del transformador de la SE, la que es absorbida por el AT de la izquierda, aquella relativa al de la derecha, y la propia intensidad consumida por el tren. La siguiente gráfica indica cómo se reflejan dichos parámetros en los diagramas elaborados por la herramienta:

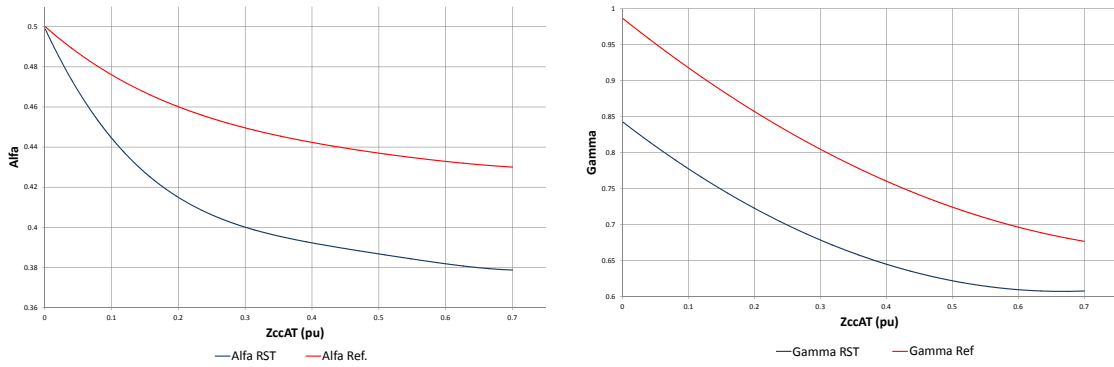


**Figura 6.39** Medida de las variables necesarias para obtener  $\alpha$  y  $\gamma$ . Elaboración propia.

$$I = I_1 + I_2 \quad ; \quad I_{1 \times 25} = (1 - \gamma) \cdot I$$

$$I_{2 \times 25A} = \alpha \cdot \gamma \cdot I \quad ; \quad I_{2 \times 25B} = (1 - \alpha) \cdot \gamma \cdot I$$

Así pues, tomando las medidas tal y como se muestra, y empleando las expresiones adjuntas, se pueden obtener los valores de los diferentes parámetros para cada valor de la  $\varepsilon_{CC}$  de los AT. Una vez obtenido un buen rango de los mismos se procede a representar la tendencia resultante junto a aquella indicada por el artículo tomado como referencia.



**Figura 6.40** Relaciones obtenidas mediante *RST* y aquellas indicadas por [12]. Elaboración propia.

Lo primero que cabe destacar es que la tendencia general se cumple para ambos casos, dándose al comienzo un descenso más pronunciado para poco a poco ir suavizando la pendiente según aumenta el valor de la impedancia. A la vista está que los valores no coinciden, siendo más distantes aquellos relativos a  $\gamma$  que los de  $\alpha$ . El hecho de que la diferencia se acentúe más en la evolución del parámetro  $\gamma$ , es explicable mediante varios aspectos: el efecto que tiene en la misma la altura del feeder (para la posición considerada todos los valores de referencia se deben reducir en una proporción del 0'95), la gran dependencia del mismo con las puestas a tierra, y la idealidad del transformador de la SE. Estos tres simples hechos hacen que el valor de  $\gamma$  para cada posición sufra una variación considerable respecto a los valores de referencia reflejados.

¿Quieren decir los resultados que la herramienta ha fracasado en su objetivo y que la misma no es fiel a la realidad? Así no lo cree el autor, pues si bien hay diferencias entre aquellos valores obtenidos en el estudio, y los arrojados por la herramienta objeto del presente documento, hay razones para justificar las mismas (tal y como se ha expuesto previamente), y con todo y con ello esta diferencia no se considera de tal magnitud como para desechar los resultados. En cualquier caso, se valora más el hecho de que la tendencia se comparta entre ambos cálculos antes de que el valor particular sea el mismo.

En conclusión, debido a las limitaciones expuestas en reiteradas ocasiones, a los motivos que justifican la diferencia entre los resultados obtenidos mediante la herramienta y aquellos mostrados en el artículo tomado como referencia, a que éste no es muy preciso en lo respecto a las condiciones consideradas a la hora de llevar a cabo el cálculo, y a

que las diferencias entre los valores son limitadas y además se comparten las tendencias para ambos parámetros, se considera igualmente que este criterio ratifica la veracidad de la presente herramienta.

## 6.3 Caso Práctico

Para cerrar el presente capítulo se le propone al lector emular un caso práctico, en el que se plantea la situación de decidir cómo explotar cierto trayecto entre dos ciudades cualesquiera, intentando mostrar de esta manera la utilidad de la herramienta desarrollada. Para ello, se recreará la situación en la que se tienen que decidir los rasgos generales del sistema eléctrico a emplear para cierto trayecto ferroviario de AV, a fin de buscar el punto óptimo de eficiencia a la hora de llevar a cabo la energización necesaria de la catenaria, proceso en el cual se empleará el código objeto del presente documento.

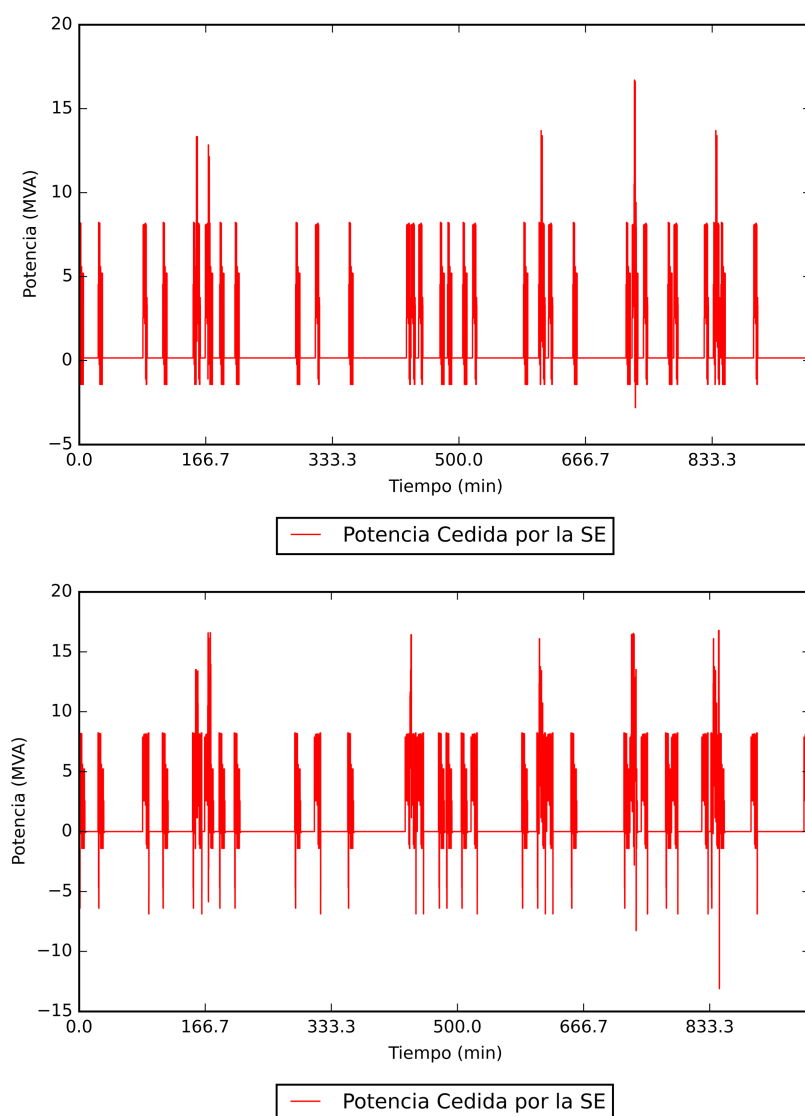
En este hipotético caso, el responsable de diseñar el sistema eléctrico de alimentación recibe en primer lugar, dado el diseño del propio trayecto, el consumo esperado a lo largo de cada punto de la vía. Como ya intuirá el lector, esta información no es otra que la contenida en el archivo .csv tantas veces mencionado a lo largo del presente documento. Así pues, una vez en posesión de toda esta cantidad de datos, se debería de proceder al diseño a primera vista del trazado eléctrico, pero las incógnitas que surgen son muchas ¿Qué configuración emplear? ¿Qué longitud de tramo? ¿Cuánto medirán las celdas?... Si bien la respuesta a parte de estas cuestiones viene indicada según el presupuesto del proyecto y la calidad del servicio que quiere ofrecer, otras casi que vienen impuestas directamente por la normativa de Adif en lo respectivo a las posibles máquinas a emplear. Por ejemplo, si el reglamento de turno impone para el  $2 \times 25$  el empleo de un transformador con potencia nominal suficiente para energizar todo un tramo de 40 km, pues efectivamente se tomará la decisión de dividir el trayecto en tramos de 40 km, para así emplear tantas menos SE como sea posible.

Para llevar a cabo las simulaciones cuyos resultados se mostrarán a continuación, se han empleado datos reales de consumo de un trayecto entre dos ciudades españolas, del cual no se desvelará información adicional alguna. De esta manera la cercanía a la realidad de este ejemplo se maximiza, pues los resultados mostrados reflejarán una situación real tanto en características de la vía (es decir, consumo a lo largo del trayecto) como en la explotación de la misma (trenes participantes y sus horas de salida). Para el resto de parámetros de menor importancia se han tomado los datos habituales ya tratados a lo largo del desarrollo del presente documento.

La primera elección a tomar por parte del diseñador será el empleo de la configuración  $1 \times 25$  o  $2 \times 25$ . Esta decisión tendrá que ser respaldada por criterios tanto económicos como de calidad del servicio, ya que si bien se sabe que la configuración sin feeder ofrecerá un peor rendimiento, puede que las pérdidas que introduzca tengan menos impacto económico que la instalación de todo un hilo por vía y los puestos de AT cada los kilómetros que procedan. Así pues, para recrear cómo condicionaría la explotación de la vía bajo un método u otro, se emplean las bondades de la herramienta objeto del documento, que simulará un tramo representativo de la vía para cada configuración.

Para ambas simulaciones se ha considerado cable de retorno, y si bien para aquella de  $1 \times 25$  se ha supuesto el empleo de un tramo de 27 km (aproximadamente un sexto del trayecto total), para la del  $2 \times 25$  se ha tomado en su lugar otro de 40 km, debido a las mayor

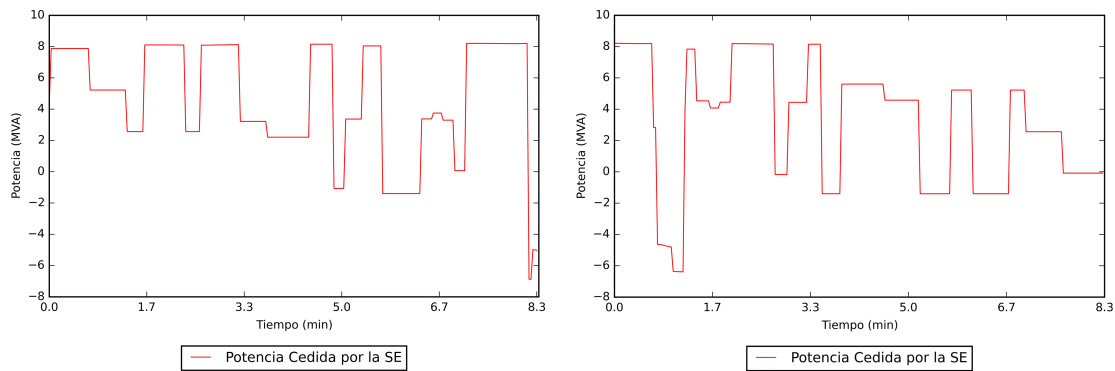
capacidad de energización que ofrece el segundo método. Igualmente se ha considerado la presencia de PPS o AT cada 10 km. Así pues, las curvas de consumo de potencia resultan tal que así:



**Figura 6.41** Curvas de cesión de potencia resultantes para los casos a  $1 \times 25$  y  $2 \times 25$ , respectivamente. Elaboración propia.

Tal y como se puede observar, toda semejanza de la curva de potencia con los escenarios concretos y teóricos vistos previamente se pierde, mostrando en esta ocasión una evolución muy variable y de cambios súbitos, con acentuados consumos e inyecciones de potencia a lo largo de todo el trayecto. Así pues, este es el aspecto general que suele presentar la curva de cesión de potencia de una línea de AV: a modo de "cardiograma", se presenta casi todo el período plana, sin cesión alguna, para cuando proceda cambiar y mostrar la forma que proceda. Precisamente, el comportamiento de la curva cuando circula un tren por el tramo será una combinación de las curvas de potencia relativas a los casos de circulación de un tren individual de ida o de vuelta. Dichas curvas, mostradas a continuación, se obtienen

fácil y rápidamente con la herramienta desarrollada, y dan una idea del impacto que tiene cada tren en el sistema de alimentación.



**Figura 6.42** Curvas de cesión de potencia asociadas al tránsito real en el tramo de ejemplo de un único tren en ida y vuelta, respectivamente, a  $2 \times 25$ . Elaboración propia.

En lo que respecta a las curvas obtenidas, puede parecer que no hay mucha diferencia entre ambas, y probablemente aquellas perceptibles tengan que ver con el hecho de que un tramo es más grande que otro, y que por ello siente más cambios de consumo que el otro. En cualquier caso, las diferencias sí que se dejan sentir cuando nos fijamos en el pico de potencia consumida y en la energía total cedida por la SE, resultando ambas 16'780 MVA y 71'982 GJ, y 16'703 MVA y 47'947 GJ para las configuraciones  $2 \times 25$  y  $1 \times 25$  respectivamente.

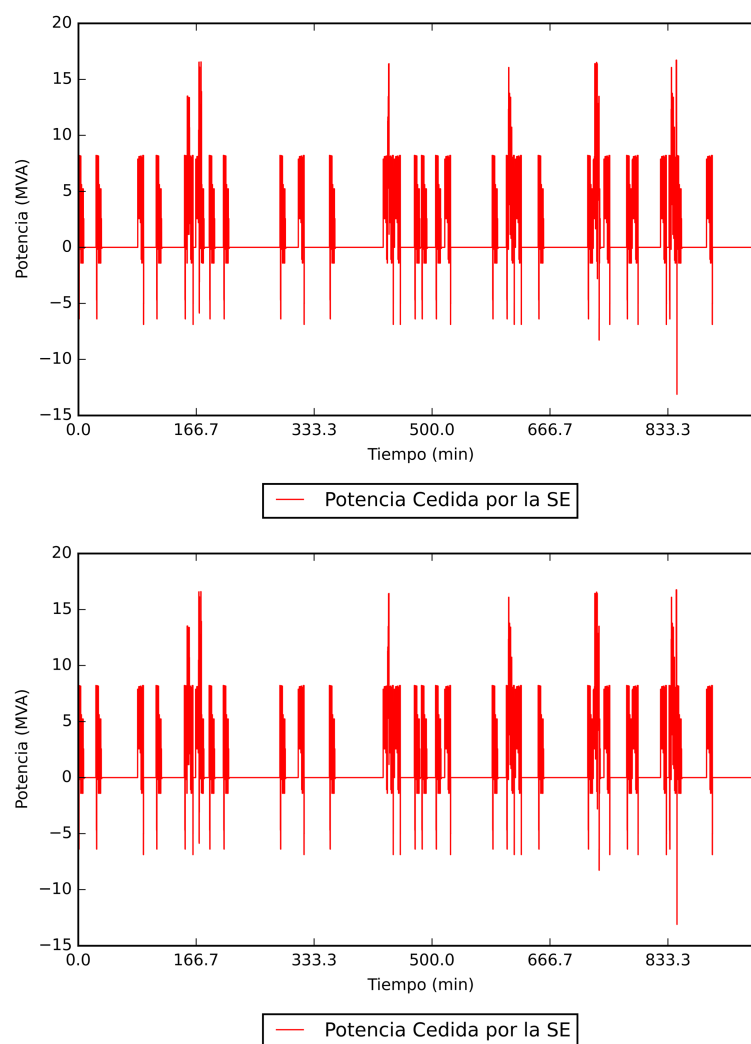
Quizás le sorprenda al lector que la energía total cedida por el teóricamente peor sistema de los dos sea la menor, pero hay que tener en cuenta que mientras un tramo cubre un sexto de la vía, el otro abarca todo un cuarto. Así pues, para realizar una oportuna comparación habría que extender los resultados a toda la vía, obteniendo de esta manera lo siguiente: 287'982 y 287'682 GJ en el mismo orden. Puede ser que de nuevo el lector se muestre sorprendido, pues prácticamente ha acontecido un empate en la energía cedida cada día, cuando según todo lo expuesto a lo largo del presente documento la configuración  $2 \times 25$  es claramente mejor. Y efectivamente, el hecho de que un sistema empleando 6 SE en lugar de 4 obtenga los mismos resultados, es un claro indicio de ello. En cualquier caso, otros aspectos no sacados a colación en la curva de potencia igualmente muestran la superioridad de esta configuración, como es el caso de la tensión mínima de contacto. Que decir tiene que las bondades del empleo de los AT se acentúan cuando hay un mayor tráfico que el de este ejemplo, razón por la cual la diferencia entre las cantidades de energía cedida es casi nula en este caso.

La elección entre un sistema u otro dependerá en última instancia del balance económico, como no podía ser de otra manera. Habría que comparar el coste que supone la instalación de kilómetros de hilo de feeder, 16 PATP y 4 SE frente a las 6 SE. Así pues, se va a considerar que la opción más conveniente es emplear el  $2 \times 25$ , principalmente por dos motivos: si el uso de la vía fuese bien recibido por la clientela y se decidiera aumentar la frecuencia de trenes, sin duda alguna este sistema ofrecería un mejor comportamiento; y además, escogiendo esta configuración también se puede mostrar el proceso de optimización del número de AT a emplear.

Una vez tomada la decisión de explotar la línea con la configuración  $2 \times 25$ , se pueden ya centrar las decisiones en precisar los valores de aquellos aspectos únicamente relativos al empleo de este sistema. Así pues, el encargado del diseño de la catenaria de este proyecto reduce a dos los parámetros más influyentes en lo que respecta a la demanda de la SE a lo largo de todo el tránsito: tipo de catenaria y posición de los AT.

Así pues, lo que procede a hacer es llevar a cabo la comparativa entre las consecuencias del empleo de las dos catenarias posibles. La diferencia fundamental entre aquellas consideradas por el proyectista es que mientras una tiene cable de retorno, la otra no, lo cual supone un gran ahorro de material. Para decidir qué catenaria es más conveniente para el proyecto, se decide llevar a cabo dos simulaciones, cada una considerando un tipo de catenaria diferente. En dichas simulaciones se tomará una distancia provisional entre AT de 12 km, valor intermedio que después se verá transformado en 10 o 13'4 km en la próxima evaluación.

De esta manera, realizando las simulaciones pertinentes, se obtienen estas curvas de consumo globales:



**Figura 6.43** Curvas de cesión de potencia resultantes para los casos con y sin retorno. Elaboración propia.



Como sucedía al realizar la última comparación, si bien ambas curvas parecen iguales, sus diferencias son más apreciables recurriendo a los mismos parámetros, siendo sus valores 16'708 MVA y 71'937 GJ para el caso con retorno y 16'751 MVA y 71'997 GJ aquel que prescinde del mismo.

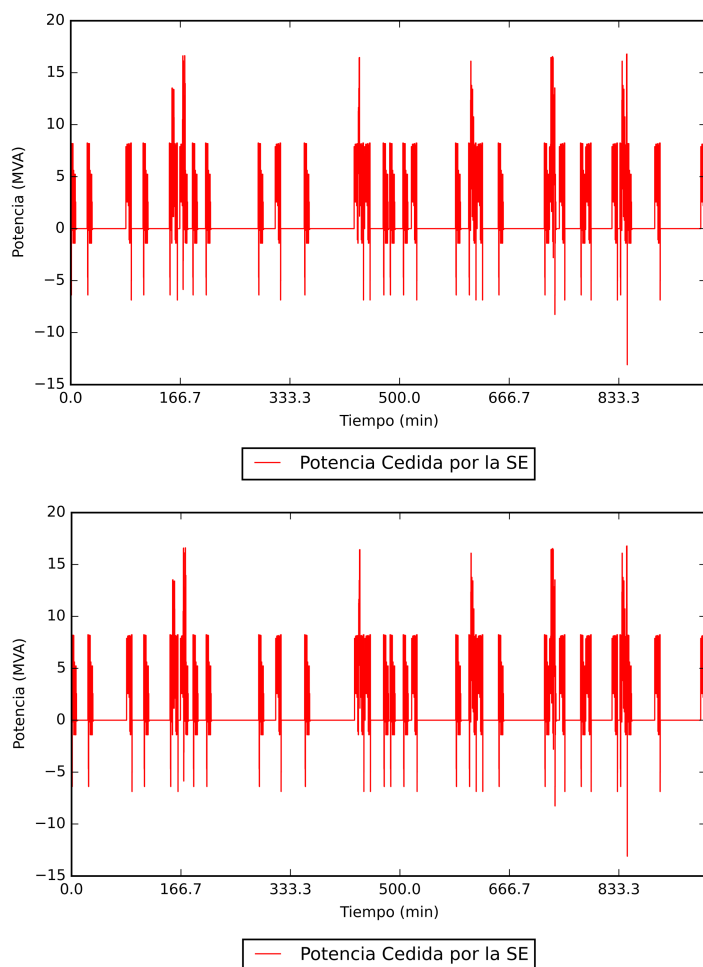
Es indiscutible que la inclusión de un cable de retorno mejora la eficiencia del sistema, al conllevar una menor cantidad de energía necesaria para alimentar a un mismo trayecto. Para poder hacer un juicio más preciso sobre las diferencias acaecidas entre un sistema y otro, se propone la traslación momentánea al plano económico: tomando el precio medio del kWh de 2015 según el Ministerio del Interior se puede obtener rápidamente el ahorro económico relativo a la mayor eficiencia, a lo largo de un año alimentando 365 veces el mismo trayecto. Así pues, la diferencia económica entre ambas configuraciones asciende aproximadamente de 500 €/anuales, lo cual suele ser más que despreciable en comparación con las cifras que se barajan en un proyecto ferroviario de AV.

Según los resultados obtenidos parece que la decisión más recomendada sería la de prescindir del cable de retorno, ya que las mejoras que introduce seguramente no compensen el gasto correspondiente a la compra e instalación de tantos kilómetros de cable. Los motivos por los cuales se ha llegado a este resultado pueden estar relacionados a un bajo tráfico o potencia demandada, ya que precisamente las bondades del empleo de un hilo adicional como retorno se acentúan cuanto más se explota la vía.

Así pues, llegado este punto el proyectista ya sabe qué tipo de catenaria emplear, pero no a qué distancia ubicar los AT, lo cual implica también cuántos emplear. Las posibilidades son reducidas en este caso igualmente, debido a que los AT que Adif permite emplear no son capaces de cubrir más de 10 - 15 km de vía, tal y como se expuso en capítulos anteriores. Así pues, se deberá discernir entre emplear 4 PATP (uno cada 10 km), o 3 (uno cada 13'3 km). Para ello, se recurre una vez más a la herramienta objeto del presente documento:

Las curvas arrojadas por la simulación quedan plasmadas en la figura a continuación, haciendo la primera referencia al caso con 3 puestos de AT, y la segunda a aquel con 4. Es obvio que la forma de ambas gráficas es similar, aunque en esta ocasión se aprecian mayores diferencias que en la comparación anterior. Así pues, el pico de consumo y energía total cedida resulta 16'829 MVA y 72'027 GJ y 16'780 MVA y 71'982 GJ para el caso de 3 y 4 AT respectivamente.

En cualquier caso, tomar una decisión ahora es más complicado que antes, pues las consecuencias de la instalación de un PATP sí que son relevantes, y no tan predecibles los costes de la inclusión del mismo. Así pues, resultados en mano, se considera finalmente que la configuración más adecuada para esta situación será la de ubicar 3 AT, uno cada 13'4 km, en un sistema carente de cable de retorno.



**Figura 6.44** Curvas de cesión de potencia resultantes para los casos con 3 y 4 AT respectivamente. Elaboración propia.

Así concluye el caso práctico, con el cual se ha hecho un simple repaso al proceso de elección de las diferentes variables y se ha puesto en valor la herramienta objeto del proyecto. El hecho de que los datos relativos a las diferentes configuraciones fueran similares no implica poca utilidad para parte del código, pues sin él no se podría saber de la existencia de tan cercana paridad. En cualquier caso, tal y como ya fue mencionado previamente, el hecho de que el funcionamiento de ambas configuraciones sea similar está íntimamente ligado con el tráfico al cual se somete la vía empleada.

Se espera que este ejemplo haya sido mínimamente ilustrador a la hora de la utilidad del código aquí desarrollado. Se considera oportuno resaltar que simplemente dados los datos de consumo esperado, según el trazado de la vía, se ha podido hacer una predicción del consumo energético necesario para habilitar este trayecto, incluso llegando a poder optimizar variables del propio sistema de alimentación.

## 7 Conclusiones y Líneas Futuras

---

**T**ras finalizar el discurso explicativo relativo a la herramienta desarrollada, presentada a lo largo del presente trabajo, es menester llevar a cabo una labor de conclusión, así como la consideración de los inmediatos pasos a dar. Para ello, y más que nunca, habrá que tener en cuenta el contexto del código elaborado, así como su encuadre en el presente trabajo y las pretensiones asumidas.

### 7.1 Conclusiones

Ciertamente el desarrollo de este código ha supuesto todo un reto para el autor, suponiendo sin duda alguna el mayor y más apasionante proyecto al que se ha enfrentado hasta la fecha. Emulando a un verdadero proyecto ingenierístico, construir el código ha implicado un prolongado proceso de análisis, acción y corrección, que incluso en el momento de la redacción se mantiene, y que se mantendrá tanto como dure el propio código. Se considera importante mencionar este aspecto, pues obviamente el código no ha alcanzado su plena expansión en el momento de la elaboración de este trabajo, aunque sin lugar a dudas sí tiene una envergadura más que suficiente como para ser objeto del mismo y ser empleado tanto en aplicaciones académicas como prácticas.

En cualquier caso, se considera que el objetivo planteado en este documento ha sido alcanzado, y si se permite la licencia, con creces. Se ha conseguido desarrollar desde la nada toda una herramienta adaptativa, versátil y robusta que permite recrear situaciones reales con alto grado de complejidad, empleando para ello un modelo eléctrico que considera un nivel de detalle más que minucioso. Obviamente hay aspectos que añadir, no reconocer lo contrario sería pecar de soberbia y ceguera, como podrían ser la consideración del contenido armónico de las corrientes pertinentes o la mejora el tiempo de computación, entre tantos otros. En cualquier caso, aquellos factores de mayor relevancia para un estudio de flujo de potencia son los reflejados en los resultados, por lo que se puede afirmar que para el ánimo de la herramienta, así como su aplicación de diseño, se cubren apropiadamente las necesidades oportunas.

Igualmente satisfactoria se considera la evaluación a la que se han sometido los resultados pertinentes, empleando para ello instrumentos tanto de origen práctico como teórico. A lo largo del apartado correspondiente se han valorado tanto las fortalezas como las debilidades de los resultados obtenidos, ofreciendo siempre una justificación a aquellos comportamientos observados

## 7.2 Líneas Futuras

Dicho todo lo anterior, se muestran a continuación ciertas vertientes que podría seguir el devenir del código, ya sea en la confirmación de su veracidad, mejora del mismo, ampliación de su rango de acción, o ya aplicación en otros estudios. Obviamente sólo se exponen algunas de las posibilidades en cuanto a los pasos inmediatos a dar, pues si bien no todas despiertan el mismo interés, algunas son más factibles que otras.

### 7.2.1 Comprobación Vía Real

El que se cree que debería ser el primer paso a dar llegado este momento es el de la contrastación de *RST* con la realidad. Sería ciertamente oportuno tener la oportunidad de poder llevar a cabo las medidas necesarias durante un tránsito ferroviario dado, para así al introducir los datos característicos del mismo en la herramienta, poder evaluar de manera práctica y clara la cercanía a la realidad de los resultados obtenidos.

Ciertamente se espera que esto sea posible en un corto-medio plazo, pues si bien entra dentro de las posibilidades actuales, supondría la oportunidad de, o bien continuar con el desarrollo del código sabiendo que lo hecho hasta ahora es correcto, o poder refinar el modelo de vía empleado para que los resultados arrojados sí que coincidan con aquellos reales.

Si no se pudiera dar el caso de llevar a cabo esta contrastación, habría que buscar vías alternativas, como sería la comparación con los resultados que arrojan otros instrumentos de aplicación semejante. Obviamente esta segunda opción se considera sensiblemente peor que la primera, ya que además de que no se puede saber si el resto de herramientas se acerca más o menos a la realidad, tampoco se conoce su método de cálculo y modelado, por lo que todo quedaría supeditado a estos aspectos.

### 7.2.2 Extensión al Resto de Sistemas

Otro camino que emprender, más relacionado con el rango de aplicación y utilidad en general del *RST*, es la generalización del mismo en lo que a sistemas de alimentación respecta. Si bien esta labor puede parecer sencilla, realmente implica el desarrollo de toda una nueva herramienta, ya que la estructura del resto de sistemas de catenaria, tal y como ha podido comprobar el lector en el capítulo de particularidades, poco o nada tienen que ver en lo que respecta al detalle y estructura menor.

Bien es cierto que llevar a cabo esta extensión tendría repercusiones muy positivas en lo que a empleabilidad del código se refiere, ya que se abriría la posibilidad de aplicar la herramienta a las inmediaciones de las grandes estaciones, pudiendo así cubrir todo el trayecto comprendido entre dos ciudades. En cualquier caso sería ciertamente complicado llevar a cabo una simulación relativa al flujo de potencia acontecido a lo largo de todo un día en una estación de gran calado, ya que habría que tener en cuenta numerosos convoyes diferentes, cada uno con un comportamiento propio, confluyendo todos en un mismo punto.

Sea como fuere, el hecho de extender la cantidad de sistemas cubiertos no implica cubrir todos. Por ejemplo, debido a los motivos expuestos a lo largo del presente documento, no tendría mucho sentido incluir la configuración a 16'7 Hz, simplemente por razones de utilidad. Tal y como ya ha sido expuesto, especial interés tendría la inclusión de las

modalidades a CC, que además de comunes, se suelen combinar con aquellos a CA y frecuencia industrial.

### 7.2.3 Desarrollo Aguas Arriba e Impacto en la Red

Una aplicación bien interesante de los resultados arrojados por la herramienta desarrollada, es el impacto de un tránsito ferroviario en la red de transporte. Con un enfoque muy simplista, se puede decir que una vez que se posee la evolución de la potencia demandada por cada tramo, cada SE y toda su catenaria se puede reducir a una carga variable conectada a dos fases de la red, que según transcurra el tiempo adapte su valor a aquel del trayecto modelado.

De esta manera se podría "jugar" también con el orden de las fases a las que conectarse, la importancia que tiene la distancia entre las SE en lo que respecta al desequilibrio introducido, cómo puede afectar al servicio en las inmediaciones, las corrientes que produce en cada fase... Obviamente un aspecto de gran importancia en estos análisis es el contenido armónico, por lo que para sacarle todo el jugo a esta posibilidad, primero habría que considerar el contenido armónico de las intensidades en la catenaria.

Quizás adoptando este planteamiento se pusiera aún más en valor el empleo del sistema de AT, ya que el criterio a adoptar para juzgar la adecuación de una configuración u otra para el trayecto de turno, se extendería ahora al impacto que tiene la misma en la propia red y las consecuencias que supone. De nada serviría emplear un sistema económico que "ensucia" la red que lo alimenta, empeorando así el servicio ofrecido, aumentando las pérdidas, y en general arruinando el proyecto llevado a cabo.

### 7.2.4 Evaluación Económica

Una posible ampliación de *RST* muy ilustrativa y de cierta simplicidad es la inclusión de un breve análisis financiero relativo al trayecto introducido. Esta evaluación deberá tener en cuenta el precio de los materiales, una aproximación para el coste que supone cada gran instalación (SE, PATP,...) y el precio del MWh, así como en una versión más precisa la vida útil de cada elemento y su coste de mantenimiento. Con toda esta información, se estaría en las condiciones necesarias para ofrecer una primera indicación sobre si, por ejemplo, un aumento de la eficiencia del sistema compensa el incremento de la inversión necesaria.

Una forma muy simple de comprobar la utilidad de esta pequeña aplicación extra es echar un vistazo al caso práctico del capítulo de evaluación, para así comprobar que sin una idea del orden de magnitud asociado al coste de cada aspecto del sistema no se puede realizar un juicio mínimamente justo y serio. Obviamente, esta herramienta solamente serviría para mostrar un análisis primario y simplista sobre todos los aspectos que afectan a la rentabilidad de la explotación del trayecto, según se emplee una configuración u otra. Claro es que para una evaluación más seria cada proyecto conoce perfectamente los diferentes costes y parámetros económicos relacionados con el mismo.

### 7.2.5 Proyección Desde Cero

Finalmente, se consideraría igualmente enriquecedor la inclusión de una herramienta que permita construir una versión primaria del documento .csv que contiene los consumos de potencia a lo largo de la vía. Como no podía ser de otra manera, la obtención de los datos de consumo refinadamente es bastante compleja, pero sí que se puede ofrecer un orden

de magnitud aproximadamente justo con pocos datos, como es la inclinación de la vía, la velocidad y el radio de curvatura.

Si se adoptara esta función se podría obtener un primer boceto sobre las implicaciones eléctricas que supondría la construcción de una vía a lo largo del trazado indicado. Obviamente esta aplicación está más enfocada a un uso mucho más avanzado de la herramienta, por lo que incluso se podría constar llegado el momento de una interfaz gráfica mínima que facilite las labores de introducción de datos, y por ende, de la indicación del trazado.

# Índice de Figuras

---

1.1	Evolución del consumo del sector del transporte a nivel mundial. Fuente: [1]	2
1.2	Mapa con las actuales y futuras principales vías ferroviarias en Europa. Fuente: [4]	2
1.3	Estación de Lecco, Italia. Captura propia	3
1.4	Interfaz típica de OpenDSS. Captura propia	5
2.1	Diagrama típico simplificado del sistema de alimentación $2 \times 25$ . Elaboración propia	9
2.2	Diversas configuraciones de conexión a la red industrial. Se muestran disposiciones en H, T y H con doble alimentación. Elaboración propia	10
2.3	Diagrama típico de una SE rectificadora. Elaboración propia	11
2.4	Confluencia de catenarias en la estación de Lecco, Italia. Captura propia	13
2.5	Ejemplo de sección de la catenaria empleada para el sistema $2 \times 25$ . Elaboración propia	14
2.6	Configuraciones habituales de catenaria. Elaboración propia	14
2.7	Conexiones PATP y DPATP. Elaboración propia	15
2.8	Puntos de RPP y DPP. En la configuración mostrada la sección neutra está siendo energizada por la SE del tramo izquierdo. Elaboración propia	16
2.9	Configuración empleada en la alimentación de los servicios auxiliares en el sistema $2 \times 25$ con una sola vía. Elaboración propia	17
2.10	Diagrama típico del sistema de alimentación $2 \times 25$ de una sola vía mostrando los puntos auxiliares. Elaboración propia	18
2.11	Diagrama del tramo POC. Elaboración propia	19
2.12	Cambio de catenaria en las inmediaciones de la estación de Milano Bovisa, Italia. Captura propia	19
2.13	Interrupción de los raíles y conexión a filtros en las inmediaciones de la estación Milano Bovisa, Italia. Captura propia	20
2.14	Esquema de las EMI en un sistema simple de un cable. Elaboración propia	21
2.15	Efectos de corrosión debido al tránsito de corriente eléctrica en una viga de acero. Fuente [6]	22
2.16	Diagrama de un IB. Elaboración propia	23
2.17	Retorno de la corriente por tierra en presencia de un ánodo como solución activa. Elaboración propia	23
2.18	Principales variables del sistema dinámico del tren. Elaboración Propia	24
2.19	Curvas de velocidad de un trayecto real de alta velocidad. Fuente: [6]	25

2.20	Aspecto cualitativo de las curvas de velocidad, aceleración, torque y potencia. Elaboración propia	26
3.1	Locomotora trifásica desarrollada por AEG en 1903. Fuente [7]	29
3.2	Tranvía de la Azienda Trasporti Milanesi empleando un sistema de CC a 1500V. Captura propia	30
3.3	Diagrama típico de una SE rectificadora. Elaboración propia	31
3.4	Primer concepto de SE bidireccional. Elaboración propia	32
3.5	Diagrama de alimentación a CC desde un solo extremo. Elaboración propia	33
3.6	Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación a CC desde un solo extremo. Elaboración propia	34
3.7	Perfiles de tensiones individuales y superpuesto resultantes de la alimentación de tres trenes a CC desde un solo extremo. Elaboración propia	34
3.8	Diagrama de alimentación doble a CC. Elaboración propia	35
3.9	Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación doble a CC. Elaboración propia	36
3.10	Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación doble a CC a la misma tensión. Elaboración propia	37
3.11	Diagrama de alimentación doble de dos vías a CC con conexión intermedia. Elaboración propia	38
3.12	Perfiles de tensiones resultantes de la alimentación doble a CC con conexión entre vías. Se muestran los perfiles a lo largo de la catenaria hasta la unión en $\frac{L}{2}$ . Elaboración propia	39
3.13	Diagrama del sistema a 16'7 Hz con alimentación centralizada. Elaboración propia	41
3.14	Diagrama del sistema a 16'7 Hz con alimentación distribuida. Elaboración propia	42
3.15	Antiguo modelo AVE funcionando en un sistema $2 \times 25$ . Fuente: [8]	43
3.16	Diagrama de la configuración de tercer orden. Elaboración propia	44
3.17	Diagrama vectorial de la configuración de tercer orden. Elaboración propia	44
3.18	Diagrama de la configuración de conexión Scott. Elaboración propia	45
3.19	Diagrama vectorial de la configuración de conexión Scott. Elaboración propia	45
3.20	Diagrama de la configuración de sexto orden. Elaboración propia	46
3.21	Diagrama vectorial de la configuración de sexto orden. Elaboración propia	46
3.22	Diagrama de conexiones de un transformador de la SE del sistema $2 \times 25$ . Elaboración propia	47
3.23	Diagrama típico del sistema de catenaria de la configuración $2 \times 25$ . Elaboración propia	48
3.24	Cartel avisando del cese de la alimentación antes de la entrada en una sección neutra. Captura propia	49
3.25	Diagrama de las versiones completas de catenaria del $2 \times 25$ y $1 \times 25$ . Se muestran sólo los cables relevantes para el flujo de potencia. Elaboración propia	49
3.26	Foto de los AT empleados en un DPATP. Fuente [6]	50
3.27	Comparación de la caída de tensión desde la SE al pantógrafo en tres configuraciones diferentes: línea verde $1 \times 25$ , línea roja $1 \times 25$ de doble sección de hilo, y línea azul $2 \times 25$ . Fuente [10]	50
3.28	Distribución ideal de corrientes en la configuración $2 \times 25$ . Elaboración propia	51
3.29	Distribución real de corrientes en la configuración $2 \times 25$ . Elaboración propia	52
3.30	Relación $\varepsilon_{CC} - \alpha$ y $\varepsilon_{CC} - \gamma$ . Fuente: [12]	52



4.1	Diagrama simplificado del circuito base empleado para el caso de $2 \times 25$ doble vía. Elaboración propia	56
4.2	Planteamiento adoptado para discretizar el trayecto de los trenes en varios instantes. Elaboración propia	57
4.3	Diagrama de flujo del proceso empleado para escoger el escenario procedente. Elaboración propia	58
4.4	Comparación entre los dos enfoques posibles al considerar la segunda vía en la configuración $1 \times 25$ . Elaboración propia	59
4.5	Hilos equivalentes considerados en el caso $2 \times 25$ doble vía. Elaboración propia	60
4.6	Modelos simplificados de transformador empleados. Elaboración propia	62
4.7	Modelo de línea eléctrica en II empleado. Elaboración propia	63
4.8	Modelo del IB en una catenaria del $2 \times 25$ . Elaboración propia	64
4.9	Modelo del PPS. Elaboración propia	65
4.10	Modelo del PATP, haciendo las veces de PPS. Elaboración propia	66
4.11	Modelo del tren en los dos escenarios posibles. Elaboración propia	66
4.12	Modelos generales de la configuración $1 \times 25$ . Elaboración propia	67
4.13	Modelos generales de la configuración $2 \times 25$ doble vía. Elaboración propia	68
4.14	Proceder general simplificado en el cálculo de los parámetros eléctricos. Elaboración propia	69
4.15	Relación entre $R_{CC}$ y $R_{CA}$ según los valores de $\frac{a}{r_O}$ . Fuente: [13]	70
4.16	Sistema empleado por el método de la profundidad compleja en una configuración $1 \times 25$ . Elaboración propia	71
5.1	Diagrama de flujo maestro conceptual del RST con los principales apartados. Elaboración propia	78
5.2	Diagrama de flujo conceptual del módulo de adquisición de datos de entrada. Elaboración propia	79
5.3	Diagrama de flujo conceptual del apartado de tratamiento de datos de entrada. Elaboración propia	81
5.4	Diagrama de flujo conceptual del apartado de cálculo de parámetros. Elaboración propia	82
5.5	Diagrama de flujo conceptual del apartado de simulaciones y resultados. Elaboración propia	83
5.6	Diagrama de flujo conceptual del subapartado de construcción. Elaboración propia	84
5.7	Modelo facilitado del archivo .txt a rellenar por el usuario. Captura propia	87
5.8	Estructura típica del archivo .csv. Captura propia	88
5.9	Ejemplificación de la información que nos da el archivo .csv. Elaboración propia	88
5.10	Diagrama de flujo simplificado del módulo TrenesDentro. Elaboración propia	90
5.11	Ejemplificación del proceso seguido a lo largo de las iteraciones en un trayecto de única vía, así como las variables en juego. Elaboración propia	92
5.12	Ejemplo de curva de potencia creada por <i>RST</i> . Elaboración propia	93
5.13	Ejemplo del perfil de tensiones creado por <i>RST</i> . Elaboración propia	94
5.14	Ejemplo de la distribución de corrientes creada por <i>RST</i> . Elaboración propia	94
5.15	Diagrama de flujo implementado del <i>RST</i> . Elaboración propia	95
6.1	Representación del primer caso de estudio. Elaboración propia	108
6.2	Curva de consumo resultante del primer caso de estudio. Elaboración propia	108

6.3	Perfil de tensiones resultante del primer caso de estudio. Elaboración propia	109
6.4	Distribución de corrientes resultante del primer caso de estudio. Elaboración propia	110
6.5	Representación del segundo caso de estudio. Elaboración propia	110
6.6	Curva de consumo resultante del segundo caso de estudio. Elaboración propia	111
6.7	Perfil de tensiones resultante del segundo caso de estudio. Elaboración propia	111
6.8	Distribución de corrientes resultante del segundo caso de estudio. Elaboración propia	112
6.9	Representación del tercer caso de estudio. Elaboración propia	113
6.10	Curva de consumo resultante del tercer caso de estudio. Elaboración propia	113
6.11	Perfil de tensiones resultante del tercer caso de estudio. Elaboración propia	114
6.12	Distribución de corrientes resultante del tercer caso de estudio. Elaboración propia	115
6.13	Representación del cuarto caso de estudio. Elaboración propia	116
6.14	Curva de consumo resultante del cuarto caso de estudio. Elaboración propia	117
6.15	Perfil de tensiones resultante del cuarto caso de estudio. Elaboración propia	117
6.16	Distribución de corrientes resultante del cuarto caso de estudio. Elaboración propia	118
6.17	Representación del quinto caso de estudio. Elaboración propia	118
6.18	Curva de consumo resultante del quinto caso de estudio. Elaboración propia	119
6.19	Perfil de tensiones resultante del quinto caso de estudio. Elaboración propia	119
6.20	Distribución de corrientes resultante del quinto caso de estudio. Elaboración propia	120
6.21	Representación del sexto caso de estudio. Elaboración propia	120
6.22	Curva de consumo y perfil de tensiones resultantes del sexto caso de estudio. Elaboración propia	121
6.23	Distribución de corrientes resultante del sexto caso de estudio. Elaboración propia	121
6.24	Representación del séptimo caso de estudio. Elaboración propia	122
6.25	Curva de consumo resultante del séptimo caso de estudio. Elaboración propia	122
6.26	Perfiles de tensiones resultantes del séptimo caso de estudio para dos instantes diferentes. Elaboración propia	123
6.27	Distribución de corrientes resultante del séptimo caso de estudio. Elaboración propia	124
6.28	Distribución de corrientes resultante del séptimo caso de estudio cuando ambos trenes se encuentran en la mitad del tramo. Elaboración propia	124
6.29	Representación del octavo caso de estudio. Elaboración propia	125
6.30	Curva de consumo resultante del octavo caso de estudio. Elaboración propia	125
6.31	Perfil de tensiones resultante del octavo caso de estudio. Elaboración propia	126
6.32	Distribución de corrientes resultante del octavo caso de estudio. Elaboración propia	126
6.33	Representación del noveno caso de estudio. Elaboración propia	127
6.34	Curva de consumo resultante del noveno caso de estudio. Elaboración propia	128
6.35	Perfil de tensiones resultante del noveno caso de estudio. Elaboración propia	128
6.36	Distribución de corrientes resultante del noveno caso de estudio. Elaboración propia	129
6.37	Comparación de la caída de tensión desde la SE al pantógrafo en tres configuraciones diferentes: línea verde $1 \times 25$ , línea roja $1 \times 25$ de doble sección de hilo, y línea azul $2 \times 25$ . Fuente [10]	131
6.38	Relación $\varepsilon_{CC} - \alpha$ y $\varepsilon_{CC} - \gamma$ . Fuente: [12]	132
6.39	Medida de las variables necesarias para obtener $\alpha$ y $\gamma$ . Elaboración propia	133
6.40	Relaciones obtenidas mediante <i>RST</i> y aquellas indicadas por [12]. Elaboración propia	134
6.41	Curvas de cesión de potencia resultantes para los casos a $1 \times 25$ y $2 \times 25$ , respectivamente. Elaboración propia	136
6.42	Curvas de cesión de potencia asociadas al tránsito real en el tramo de ejemplo de un único tren en ida y vuelta, respectivamente, a $2 \times 25$ . Elaboración propia	137

---

6.43	Curvas de cesión de potencia resultantes para los casos con y sin retorno. Elaboración propia	138
6.44	Curvas de cesión de potencia resultantes para los casos con 3 y 4 AT respectivamente. Elaboración propia	140



# Índice de Tablas

---

2.1	Fases del trayecto entre dos paradas. Elaboración propia	25
3.1	Puestos empleados en las configuraciones $1 \times 25$ y $2 \times 25$ . Elaboración Propia.	48
4.1	Valores habituales de los parámetros del transformador de la SE, empleados por defecto en <i>RST</i>	62
4.2	Valores habituales de los parámetros del conjunto de AT, empleados por defecto en <i>RST</i>	65
5.1	Caso procedente según los valores de <i>dim</i> y <i>F</i> . Elaboración Propia.	97
6.1	Resultados en pu relativos a los diferentes escenarios considerados. Elaboración Propia	130
6.2	Resultados con sus valores en bruto. Elaboración Propia	130



# Bibliografía

---

- [1] U.S. Energy Information Administration. *Monthly Energy Review: February 2016*, 2016.
- [2] Ministerio de Fomento Gobierno de España. *Tablas Estadísticas 14: Capítulo 19. Indicadores económicos del transporte y almacenamiento; información y comunicaciones*, 2014.
- [3] Ministerio de Fomento Gobierno de España. *Tablas Estadísticas 14: Capítulo 20. Comparación internacional de los transportes*, 2014.
- [4] Wikipedia. *Tren de Alta Velocidad*, 2016.
- [5] Robert Dugan. *The Open Distribution System Simulator (TM). Reference Guide*, 2016.
- [6] Dario Zaninelli Morris Brenna. *Electric Systems for Transportation, Part I: Power Supply Systems*, 2015.
- [7] Centro Politécnico Superior de Zaragoza. *Introducción Histórica - Tracción Eléctrica*, 2016.
- [8] República de las Ideas. *Renfe e Iberia lanzarán un billete único de tren y avión*, 2015.
- [9] Adif. *Especificación Técnica 03.359.504.2 - Transformadores de Potencia para Subestaciones de Tracción. Sistema 2 × 25 kV*, 2014.
- [10] Ineco. *Comparative Study of the Electrification Systems: 1X25 kV and 2X25 kV*, 2011.
- [11] Adif. *Especificación Técnica 03.359.505.9 - Autotransformadores Sumergidos en Aceite para Subestaciones de Tracción*, 2014.
- [12] Morris Brenna y Federica Foiadelli. *Sensitivity Analysis of the Constructive Parameters for the 2x25-kV High-Speed Railway Lines Planning*, 2010.
- [13] Pedro Luis Cruz Romero y José Antonio Rosendo. ETSI de la US. *Apuntes de la asignatura Líneas Eléctricas - Parámetros de las Líneas de Transmisión*, 2013.
- [14] Electric Power Research Institute. *The Open Distribution System Simulator (TM). Cheat Sheet*, 2014.

- [15] Izudin Džafić y otros. *Generalized Pi Fortescue Equivalent Admittance Matrix Approach to Power Flow Solution*, 2014.
- [16] Minkyu Kim y otros. *A Study on the Impedance Calculation by using Equivalent Model in Catenary System*, 2010.
- [17] Eduardo Pilo y otros. *A Monovoltage Equivalent Model of Bi-Voltage Autotransformer-Based Electrical Systems in Railways*, 2012.